



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

EFEITO DO TEOR DE CARBONO DO METAL DE ADIÇÃO E DO
METAL DE BASE SOBRE A POROSIDADE DO METAL DE SOLDA
SUBAQUÁTICA

LUCIANO GERALDO DAMASCENO ANDRADE

Belo Horizonte, 24 de Março de 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Luciano Geraldo Damasceno Andrade

**EFEITO DO TEOR DE CARBONO DO METAL DE ADIÇÃO E DO
METAL DE BASE SOBRE A POROSIDADE DO METAL DE SOLDA
SUBAQUÁTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais,
como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação por Soldagem

Orientador(a): Prof. Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG 2010



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte MG
Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783
www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

EFEITO DO TEOR DE CARBONO DO METAL DE ADIÇÃO E DO METAL DE BASE SOBRE A POROSIDADE DO METAL DE SOLDA SUBAQUÁTICA

LUCIANO GERALDO DAMASCENO ANDRADE

Dissertação defendida e aprovada em 24, de Março de 2010, pela Banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Processos de Fabricação por Soldagem**".

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense – UFMG – Orientador

Prof. Dr. Ezequiel Caires Pereira Pessoa – IFMG – Examinador

Prof. Dr. Valter Rocha dos Santos – PUC-RJ - Examinador

Prof. Dr. Jose Antonio Esmerio Mazzaferro – UFRGS - Examinador

Ao Senhor e aos meus amados pais,

Jaci e Geralda,

pelo precioso amor dispensado.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor pelo suporte e amor e reconhecimento incondicional.

Aos meu pais Jaci e Geralda e irmãos Douglas e Laiana pela educação, familiaridade e apoio.

Ao Professor Alexandre Queiroz Bracarense pelas oportunidades e pelos constantes ensinamentos.

Ao Professor Stephen Liu pela oportunidade e desenvolvimento desse trabalho na Colorado School of Mines – CSM, nos Estados Unidos.

A Ezequiel C. P. Pessoa pelo companheirismo, pelas discussões científicas e pelos conselhos.

A Faustino Pérez Guerrero pela confiança e suporte, mesmo que distante, durante o trabalho desenvolvido nos Estados Unidos.

A Valter Rocha dos Santos pelas discussões científicas no desenvolvimento da parceria PUC-RJ com o LRSS-UFMG.

Ao senhor Michael Else pela confiança no desenvolvimento da parceria UFMG – Colorado School of Mines.

A todo os amigos do LRSS, pelos momentos dedicados ao trabalho, porém nunca deixando o bom humor, a cooperação e a amizade de lado.

Ao diretor do Departamento de Engenharia Mecânica e ao coordenador do curso de pós-graduação em engenharia mecânica da UFMG.

Ao Center for Welding, Joining & Coatings Research da Colorado School of Mines, EUA.

Aos professores, amigos e colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

A DEVASCO Int.-EUA pelo fornecimento de material e eletrodos e pelas discussões técnicas, em especial ao engenheiro Keith Moline.

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

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

E a todos que colaboraram para que esse trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	12
LISTA DE EQUAÇÕES	14
RESUMO	15
ABSTRACT	17
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVO	18
1.1. Objetivos	19
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. Introdução à soldagem a arco com eletrodos revestidos – shielded metal arc welding (SMAW)	20
2.2. Introdução à soldagem subaquática	21
2.3. O ambiente na soldagem subaquática molhada	24
2.3.1. <u>Porosidade em soldas molhadas</u>	25
2.3.2. <u>Consumíveis em soldagem subaquática</u>	42
2.4. Morfologia do cordão de solda	46
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAIS	51
3.1. Equipamentos e materiais utilizados	51
3.2. Procedimentos experimentais	56
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1. Inspeção visual	59
4.2. Análise química do metal de solda	62

4.3. Geometria do cordão de solda e análise dos sinais de tensão	65
4.4. Porosidade no metal de solda	73
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	80
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXO A	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Processo de soldagem por eletrodo revestido (AWS).

Figura 2.2. Mergulhadores realizando soldagem subaquática. Fonte desconhecida.

Figura 2.3. Faixa de tensão-corrente para diferentes pressões de soldagem (1 Bar = 1m metros de coluna d'água) (Perez, 2003).

Figura 2.4. Efeito da pressão na porosidade do metal de solda (10 m de profundidade \Leftrightarrow 98,1 kPa) (SUGA e HASUÍ, 1986)(ASM).

Figura 2.5. Solubilidade do hidrogênio no ferro em função da temperatura (GRONG, 1997 apud PESSOA, 2007).

Figura 2.6. Variação da porosidade no metal de solda em função da adição de carbonato de cálcio no revestimento de eletrodos E6013 (SANCHEZ, 1994) (SANCHEZ et al, 1995).

Figura 2.7. Porosidade no metal de solda em função da profundidade de soldagem e da adição de ferro-manganês ao revestimento de eletrodos rúflicos (ROWE, 1999).

Figura 2.8. Porosidade em soldas molhadas depositadas utilizando eletrodo revestido com diferentes concentrações de ferro-manganês em quatro profundidades (gráfico plotado por PEREZ, 2007 com dados de ROWE, 1999).

Figura 2.9. Porosidade em soldas molhadas depositadas em diferentes profundidades usando eletrodo revestido com adição de ferro-manganês, ferro-titânio (gráfico plotado por PEREZ, 2007 com dados de ROWE, 1999).

Figura 2.10. Porosidade como função do oxigênio no metal de solda, medido em soldas molhadas em quatro diferentes profundidades usando eletrodo com adição de manganês, titânio-boro e terras raras (REM). Os símbolos maiores do gráfico correspondem às soldas feitas com terras raras no eletrodo (ROWE, 1999).

Figura 2.11. Esquema ilustrativo das forças agindo em uma gota na ponta do eletrodo (PEREZ, 2007).

Figura 2.12. Efeito da corrente de soldagem nas forças que agem sobre as gotas (LANCASTER, 1984).

Figura 2.13. Macrografias mostrando a seção transversal no início (a) e no final (b) de uma solda molhada em chanfro com eletrodo E6013 em aço A-36 (LUI e PEREZ, 2006).

Figura 2.14. Porosidade no metal de solda molhada versus corrente de soldagem em três eletrodos comerciais diferentes a 50 metros de profundidade (PESSOA et al, 2003).

Figura 2.15. Porosidade no metal de solda molhada versus corrente em soldagem de três eletrodos comerciais a 100 metros de profundidade (PESSOA et al, 2003).

Figura 2.16. Variação do teor de hidrogênio no metal de solda para eletrodos oxidante, básico e rutílico (GOOCH, 1983).

Figura 2.17. Mapa de contorno da variação de ferrita acicular com a concentração de titânio e boro no metal de solda (SANCHEZ-OZIO, 1994).

Figura 2.18. Desenho esquemático (PESSOA, 2007) mostrando o efeito da polaridade na geometria do cordão de solda e no comprimento de arco baseado no modelo proposto por TSAI e MASUBUCHI, 1977.

Figura 2.19. Comportamento da tensão superficial em função da temperatura e movimento convectivo na poção de fusão devido ao Efeito Marangoni com a sua respectiva influência na morfologia do cordão de solda. a) Maior concentração de elementos ativos e, b) menor concentração de elementos ativos (S, O, Se) (MILLS e KEENE, 1990).

Figura 3.1. Fotografia do sistema de soldagem por gravidade.

Figura 3.1. Fotografia do sistema de soldagem por gravidade e esquema representativo dos ângulos considerados.

Figura 3.3. Esquema do sistema de aquisição de dados (PESSOA, 2003).

Figura 3.4. Metodologia para retirada das amostras (PESSOA, 2003).

Figura 3.5. Parâmetros da morfologia do cordão de solda.

Figura 3.6. Procedimento de retirada de amostra para realização de análise química.

Figura 4.1. Cordões de solda realizados sobre o metal de base não cementado.

Figura 4.2. Cordões de solda realizados sobre o metal de base cementado.

Figura 4.3. Detalhes da superfície dos cordões de solda realizados.

Figura 4.4. Composição química do metal de solda.

Figura 4.5. Diferença entre as concentrações dos elementos teóricos e medidos do metal de solda.

Figura 4.6. Penetração dos cordões de solda.

Figura 4.7. Reforço dos cordões de solda.

Figura 4.8. Largura dos cordões de solda.

Figura 4.9. Razão penetração/largura (D/W).

Figura 4.10. Tensão de soldagem e número de curtos-circuitos.

Figura 4.11. Valores de tensão de soldagem.

Figura 4.12. Número de curtos-circuitos.

Figura 4.13. Macrografia de três cordões de solda realizados com as combinações chapa não cementada (N) e eletrodo não cementado (EN).

Figura 4.14. Macrografia de três cordões de solda realizados com as combinações chapa não cementada (N) e eletrodo cementado (EC).

Figura 4.15. Macrografia de três cordões de solda realizados com as combinações chapa cementada (C) e eletrodo não cementado (EN).

Figura 4.16. Macrografia de três cordões de solda realizados com as combinações chapa cementada (C) e eletrodo cementado (EC).

Figura 4.17. Porosidade no metal de solda.

Figura A.1. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo não cementado, cordão 1.

Figura A.2. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo não cementado, cordão 2.

Figura A.3. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo não cementado, cordão 3.

Figura A.4. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo cementado, cordão 1.

Figura A.5. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo cementado, cordão 2.

Figura A.6. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo cementado, cordão 3.

Figura A.7. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo não cementado, cordão 1.

Figura A.8. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo não cementado, cordão 2.

Figura A.9. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo não cementado, cordão 3.

Figura A.10. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo cementado, cordão 1.

Figura A.11. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo cementado, cordão 2.

Figura A.12. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo cementado, cordão 3.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição de gases medida nos poros em solda molhada.

Tabela 2.2. Porosidade (%) medida na seção transversal dos cordões sobre chapa (BRACARENSE et al, 2003) (LIU et al, 2004).

Tabela 2.3. Modos de transferência de metal (IIW, 1977).

Tabela 2.4. Minerais utilizados em revestimentos de eletrodos e suas funções.

Tabela 3.1. Composição química da alma dos eletrodos utilizados.

Tabela 3.2. Composição química dos materiais de base utilizados.

Tabela 3.3. Parâmetros de soldagem utilizados para os testes.

Tabela 4.1. Diluição dos cordões de solda.

Tabela 4.2. Diferença entre o teor de carbono esperado e o que realmente foi transferido para o metal de solda.

Tabela 4.3. Diferença entre o teor de manganês esperado e o que realmente foi transferido para o metal de solda.

Tabela 4.4. Diferença entre o teor de silício esperado e o que realmente foi transferido para o metal de solda.

Tabela 4.5. Tabela resumo de causa e efeito.

LISTAS DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CE	Carbono equivalente
P_g	Pressão parcial de gases solúveis
P_a	Pressão atmosférica
P_h	Pressão hidrostática
P_b	Aumento da pressão devido à curvatura do poro
γ	Tensão superficial entre metal líquido e o poro
r	Raio do poro / Raio da gota
F_g	Força gravitacional
F_d	Força de arraste
F_{em}	Força eletromagnética
F_γ	Força de tensão superficial
F_v	Força devido ao jato de vapor do arco
m	Massa
g	Aceleração da gravidade
V	Velocidade do gás
ρ	Densidade do gás
C	Coefficiente de arraste
r_w	Diâmetro do arame
c	Constante de capilaridade
D	Diluição
A_{MB}	Área do cordão de solda abaixo da linha do metal de base
A_{MA}	Área do cordão acima da linha do metal de base

C_{MS}	Carbono teórico no metal de solda
C_{MA}	Teor de carbono no metal de adição
C_{MB}	Teor de carbono no metal de base
D	Penetração do cordão de solda
W	Largura do cordão de solda
IIW	International Institute of Welding
N	Chapa não cementada
C	Chapa cementada
EN	Eletrodo não cementado
EC	Eletrodo cementado
AWS	American Welding Society
SMAW	Shielded metal arc welding
DCEP	Direct current electrode positive
DCEN	Direct current electrode negative
CA	Corrente alternada
ASM	American Society of Metals
TIG	Tungsten Inert gas
MIG/MAG	Metal inert gas/metal active gas
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas tungsten arc welding
CE	Carbono equivalente

LISTA DE EQUAÇÕES

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{\%(Ni + Cu)}{15}$$
Equação 2.1

$$P_g > P_a + P_h + P_b$$
Equação 2.2

$$P_b = \frac{2\gamma}{r}$$
Equação 2.3

$$F_g + F_d + F_{em} \geq F_\gamma + F_v$$
Equação 2.4

$$F_g = mg$$
Equação 2.5

$$F_d = 0,5\pi V^2 \rho r^2 C$$
Equação 2.6

$$F_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_a^2}{R}\right)$$
Equação 2.7

$$F_\gamma = 2\pi r_w \mathcal{J}\left(\frac{r_w}{c}\right)$$
Equação 2.8

$$D = \frac{A_{MB}}{A_{MB} + A_{MA}}$$
Equação 4.1

$$C_{MS} = \frac{C_{MA} \cdot (100 - D) + C_{MB} \cdot (D)}{100}$$
Equação 4.2

RESUMO

Porosidade é um defeito comum em soldagem subaquática molhada. Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de criar e avaliar os mecanismos da sua formação e assim encontrar soluções para minimizá-la ou eliminá-la. A AWS – American Welding Society na norma D3.6M de 1999 define que, para a classificação de eletrodos usados em soldagem subaquática Classe A, a junta soldada deve estar isenta de porosidade superficial e possuir tamanho restrito de poro, que varia conforme a espessura do metal de base. Portanto, para se obter soldas com classificação A segundo a AWS é necessário entender e controlar o surgimento de porosidade do metal de soldas molhadas.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da variação dos teores de carbono do metal de base e da alma do eletrodo sobre a porosidade do metal de solda. Dois diferentes metais de base com variações principalmente no teor de carbono (N - 0,11% e C - 0,66%) foram utilizados para deposição das soldas feitas a 50 metros de profundidade equivalente, utilizando eletrodos comerciais E6013 envernizados com diferentes teores de carbono na alma (EN - 0,002% e EC - 0,6%). O método macrográfico de análise de imagens foi utilizado para a quantificação da porosidade. Os cordões de solda foram analisados quimicamente, assim como os metais de base e de adição utilizados.

As soldas realizadas com o eletrodo de maior teor de carbono, EC, apresentaram menor tensão de soldagem e maior número de curtos-circuitos. Devido a isso e associado com uma maior relação penetração/largura, as soldas apresentaram maior porosidade.

As soldas realizadas sobre o metal de base de maior teor de carbono apresentaram menor tensão de soldagem, porém as soldas apresentaram menor porosidade. Essa divergência foi relacionada a morfologia do cordão de solda, que apresentou menor relação penetração/largura.

A morfologia e a aparência do cordão de solda apresentaram-se fortemente influenciáveis pelo teor de carbono no metal fundido, sendo que o aumento do teor de carbono na alma do eletrodo acarretou no aumento da relação penetração/largura e na piora da qualidade superficial do cordão, e o aumento do teor de carbono no metal de base diminuiu o valor dessa relação e melhorou a qualidade dos cordões.

A estabilidade do arco também se mostrou variável com o teor de carbono do sistema, sendo que quanto maior o teor de carbono, independente da fonte, alma do eletrodo ou metal de base, menor a tensão de soldagem.

Palavras Chaves: Soldagem subaquática molhada; Porosidade; Classificação AWS Classe A; Concentração de carbono no metal de base e na alma do eletrodo.

ABSTRACT

Porosity is a very common defect observed in underwater wet welding. Several researches have been developed to understand its formation mechanisms in order to mitigate it. Free superficial pores and a limit of internal pores size in welds are important requirements to classify underwater wet electrodes regarding American Welding Society – AWS D3.6M standard. Therefore, it is very important understand and control porosity formation in wet welds to classify it regard AWS standard A.

The main objective of this work is to study the effect of base metal and core rod carbon content at wet weld metal porosity. Two different base metal carbon content (N – 0,11% and C – 0,66%) were used to deposit welds at 50 meters water depth, using two different core rod carbon content (EN – 0,002% and EC – 0,6%) in the rutile electrode E6013, covered with varnish. Porosity measurements on BOP welds were performed using the macroetch method (image analysis). Chemical analysis was carried out on weld beads, base metal and electrode core rod.

Weld beads made using higher electrode core rod carbon content, EC, presented lower arc voltage and more short-circuits. Because of this, and the higher penetration/width ratio, these welds presented higher porosity.

Weld beads made on higher base metal carbon content, C, presented lower arc voltage and lower porosity. This divergence was related to weld bead morphology resulted, which presented lower penetration/width ratio.

Weld bead morphology and appearance were very influenced by weld metal carbon content. Increasing the electrode core rod carbon content resulted on higher penetration/width ratio and on poorer weld bead superficial quality. Increasing the base metal carbon content resulted on lower penetration/width ratio and on better weld bead superficial quality.

Arc stability also was very influenced by weld metal carbon content. Higher carbon content resulted on lower arc voltage.

Keywords: *Underwater wet welding; Porosity; AWS classify standard A; Base metal and electrode core rod carbon content.*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A soldagem subaquática vem sendo realizada e pesquisada há mais de 39 anos (SILVA E HAZLETT, 1971). Porém a qualidade das soldas realizadas ainda está muito aquém dos padrões de qualidade exigidos na soldagem estrutural realizada ao ar. Muitos estudos já foram e vêm sendo realizados com o objetivo de se desenvolver processos, parâmetros e/ou consumíveis capazes de fornecer melhores resultados das soldas molhadas.

Existem diversos problemas que são ocasionados pelo ambiente molhado da soldagem, dentre eles poros, trincas, redução da tenacidade e resistência, instabilidade do arco, aprisionamento de escória e falta de fusão. Dessa maneira, a melhor alternativa para se obter excelência em soldagem subaquática é conhecer os principais problemas existentes, assim como suas origens, e através disso elaborar métodos e/ou materiais capazes de solucioná-los.

Vários estudos (SANTOS et al, 1992) (BRANDI et al, 1991) (PÉREZ, 2007) (PESSOA, 2007) focados na diminuição da porosidade no metal de solda já foram concluídos, e com eles, algumas teorias foram levantadas a respeito do surgimento dos poros no metal fundido.

Existe a teoria de que os poros surgem ao longo da solidificação do metal fundido, em que os gases se acumulam na fase líquida até que a pressão parcial dos mesmos aumente a ponto de iniciar a nucleação e o crescimento das bolhas, que formarão os poros no metal solidificado (SANTOS et al, 1992).

Uma outra teoria diz que as bolhas de gases surgem a partir da formação das gotas de metal fundido na ponta do eletrodo, através da reação do carbono com o oxigênio presente no ar, resultando em monóxido de carbono e gás carbônico. As gotas são então transferidas para a poça de fusão contendo bolhas de gases, que formarão a porosidade no metal de solda, caso não tenham tempo suficiente para escapar do metal ainda líquido (BRANDI et al, 1991) (PÉREZ, 2007).

Uma terceira teoria, que se baseia nas duas primeiras, diz que a porosidade do metal de solda é formada através dos dois métodos citados, em que a formação das bolhas de gases surge através da reação do oxigênio com o carbono, e o crescimento das mesmas se dá pela rejeição do hidrogênio pelo metal solidificado (PESSOA, 2007).

Existem grandes indícios de que a segunda teoria é a principal causadora da formação dos poros no metal das soldas molhadas. Dessa forma, é importante entender o real efeito do carbono na porosidade do metal de solda.

Esse documento contém seis capítulos, como se seguem: Capítulo 1 apresenta uma breve introdução ao assunto, Capítulo 2 contém informações extraídas da literatura, em tópicos relacionados à soldagem por eletrodo revestido, à soldagem subaquática, à porosidade e aos consumíveis de soldagem. Capítulo 3 relata os procedimentos experimentais realizados como parte desse trabalho, detalhando os materiais e os métodos utilizados. Capítulo 4 apresenta os resultados dos testes obtidos, assim como uma discussão dos mesmos. Capítulo 5 lista as conclusões desse trabalho, e o Capítulo 6 breve recomendações para trabalhos futuros que o autor acredita contribuir para aumentar a qualidade das soldas subaquáticas. Ao final do documento, uma lista das referências bibliográficas consultadas no desenvolvimento do trabalho.

1.1. Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência da concentração do carbono existente no metal de adição, na alma do eletrodo revestido, e no metal de base sobre a porosidade do metal de solda. Análise visual, estudo da morfologia do cordão e dos sinais de tensão do arco e a avaliação da porosidade foram realizados para verificar a efeito do carbono na quantidade de poros no cordão de solda.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução à soldagem a arco com eletrodos revestidos – shielded metal arc welding (SMAW)

A soldagem é um dos processos utilizados para obter a coalescência ou união localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (American Welding Society, AWS).

Um dos processos existentes para soldagem é a soldagem a arco utilizando eletrodo revestido, processo também conhecido apenas por eletrodo revestido e em inglês por shielded metal arc welding (SMAW). Trata-se de um processo manual de soldagem, em que o arco é gerado entre a ponta do eletrodo revestido e a peça de trabalho. Gás de proteção e escória são gerados pela fusão do fluxo que reveste o eletrodo, e tem a função de proteger o arco, as gotas de metal fundido, a poça de fusão e o metal de solda fundido e solidificado. As partes importantes deste processo estão mostradas na FIG. 2.1.

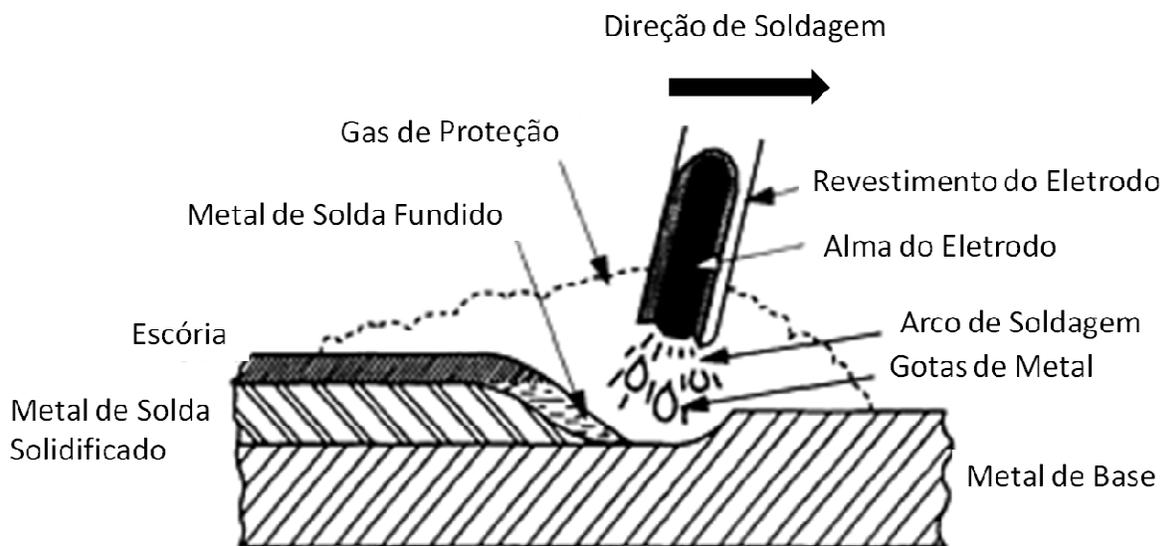


Figura 2.1. Processo de soldagem por eletrodo revestido (AWS).

Eletrodo revestido é um dos processos de soldagem mais utilizados, porém, devido a sua baixa produtividade, tem sido substituído por processos de maior produtividade, onde isso é possível. É simples, versátil e de baixo custo em relação aos outros processos de soldagem, e pode ser usado em locais de difícil acesso ou em locais abertos, sujeitos a ação de ventos. A soldagem por eletrodo é principalmente manual, porém equipamentos semi-mecanizados como equipamentos de soldagem por gravidade são utilizados.

O arco, iniciado pelo toque do eletrodo na peça, funde o metal de base e o eletrodo. Com a fusão, o eletrodo e o revestimento fundidos são transportados através do arco, devido às forças que agem no mesmo, para a poça de fusão, formando o metal de solda coberto pela escória.

A corrente elétrica utilizada para a abertura e manutenção do arco de soldagem pode ser do tipo corrente contínua com eletrodo positivo ou polaridade inversa (direct current electrode positive, DCEP), corrente contínua com eletrodo negativo ou polaridade direta (direct current electrode negative, DCEN) ou corrente alternada (CA). Em soldagem por eletrodo revestido, assim como em outros processos que utilizam eletrodo consumível, polaridade inversa é utilizada na maioria das aplicações (BRACARENSE, 1994).

2.2. Introdução à soldagem subaquática

A soldagem subaquática pode ser realizada em ambiente molhado ou protegido da água (seco) (TSAI e MASUBUCHI 1977). Assim, a soldagem subaquática foi subdividida em duas categorias: a soldagem molhada e a soldagem hiperbárica (TEICHMANN, 2000) (MAZZAFERRO, 1998) (ANDRADE, 1995). Nos dois ambientes a pressão aumenta com a profundidade de soldagem, e no caso do ambiente molhado, a taxa de resfriamento muda significativamente, alterando as transformações de fase que acontecem no metal de solda, comparados com a soldagem ao ar.

Considerando a soldagem molhada, FIG. 2.2 o processo de soldagem por eletrodo revestido é normalmente utilizado, assim como, em menor escala, por arame tubular (ASM, 1993) e por fricção (PESSOA, 2007). No caso da soldagem por arame tubular e por fricção, muitas dificuldades ainda precisam ser resolvidas para melhor aplicação do método, principalmente com relação à adaptação dos equipamentos ao ambiente aquático (ROWE e LIU, 2001) (TEICHMANN, 2000).



Figura 2.2. Mergulhadores realizando soldagem subaquática. Fonte desconhecida.

Soldagem a arco por eletrodo revestido é o principal processo aplicado à soldagem subaquática molhada, (GRUBBS, et al, 1996) e é largamente o mais utilizado para essa aplicação (PEREZ, 2003). As vantagens desse processo em relação aos outros são a simplicidade dos equipamentos utilizados, baixo custo, alta mobilidade e de fácil uso. Polaridade direta ou inversa pode ser utilizada em soldagem molhada, ao contrário de corrente alternada, que nunca deve ser utilizada, pois pode ser fatal devido aos riscos de choque elétrico ao operador (GRUBBS et al, 1996).

Existe certa divergência entre alguns pesquisadores quanto aos efeitos da polaridade na qualidade das soldas molhadas produzidas. A maioria deles afirma que polaridade inversa, eletrodo positivo, produz melhores resultados (IBARRA et al, 1994), (SUGA, 1990) (SUGA e HASUI, 1986), (WATSON et al, 1994), (POPE, 1995), (SILVA e HAZLETT, 1971) (TSAI E MASUBUCHI, 1977). Outros afirmam que, dependendo de algumas situações ou posições geográficas, obtêm-se melhores resultados utilizando a polaridade direta. Um dos locais em que foram constatadas soldas com menor porosidade utilizando eletrodo negativo foi no mar do Norte (GRUBBS et al, 1996).

A soldagem hiperbárica requer a construção de uma câmara em volta do ambiente de soldagem, criando um ambiente seco. O custo de operação nesses casos é muito maior do que para a soldagem molhada e possui menor mobilidade. Processos de soldagem MIG/MAG ou TIG podem ser utilizados

em soldagem hiperbárica (ASM, 1993). Apesar de ser muito mais cara e de gastar muito mais tempo do que a soldagem molhada, com a soldagem a seco é possível obter juntas soldadas com propriedades mecânicas comparáveis a soldas realizadas à pressão atmosférica (PESSOA, 2007).

Com o aumento da profundidade de soldagem, máquinas de maior potência são necessárias para abertura e manutenção do arco elétrico, uma vez que maiores valores de corrente e tensão serão necessários. A faixa de tensão-corrente, com a qual se pode produzir soldas aceitáveis diminui, como mostrado na FIG. 2.3. Instabilidade do arco de soldagem manifestada com a extinção do arco, larga variação do valor da corrente e tensão são problemas ocasionados pelo aumento da profundidade de soldagem.

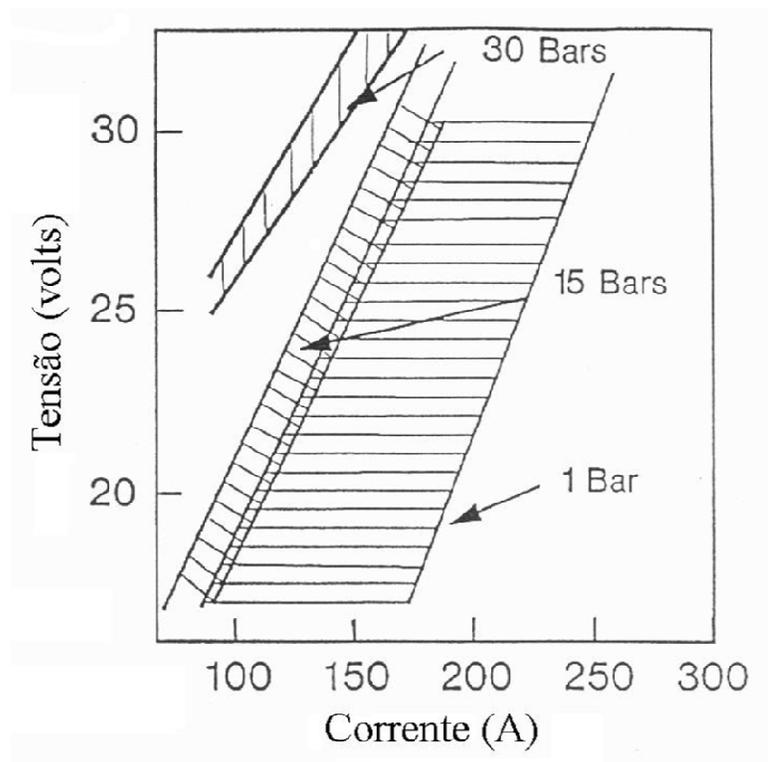


Figura 2.3. Faixa de tensão-corrente para diferentes pressões de soldagem por eletrodo revestido (1 Bar = 10 metros de coluna d'água) (IBARRA et al, 1994).

Técnicas de soldagem subaquática são utilizadas principalmente em reparos de plataformas “offshore”. Também, vem sendo largamente utilizada durante instalação de novas plataformas “offshore” e de linhas de gasoduto submarino, instalações de conexões, reparos de estaleiros e de

instalações portuárias, modificações e adições em estruturas submersas, e em reparos de instalações nucleares (ASM, 1993).

2.3. O Ambiente na soldagem subaquática molhada

A atmosfera do arco elétrico em soldagem subaquática molhada está durante todo o tempo em contato direto com a água. Quando vapor d'água fica exposto às altas temperaturas características do arco elétrico, as moléculas se decompõem em oxigênio e hidrogênio, que ficam dissolvidos no metal líquido. Oxigênio pode sair de uma solução em três formas diferentes, como inclusões sólidas de óxido, inclusões líquidas de óxido ou gases. Óxidos formados pelo oxigênio desempenham um importante papel como nucleantes de ferrita acicular no metal fundido solidificado, porém na maioria das condições, que dependem da quantidade de óxidos não metálicos no metal de solda, são nocivos, deteriorando as propriedades mecânicas e podendo atuar como nucleadores de poros. Gases são incorporados ao metal líquido na forma de poros, que podem escapar ou não durante o tempo de solidificação do metal. Hidrogênio pode formar poros no metal, reagir com o oxigênio para formar vapor d'água ou causar fragilidade e trincas no metal solidificado (ROWE, 1999).

Para a abertura e manutenção do arco elétrico, o revestimento do eletrodo desempenha um papel importante. O vapor d'água produzido durante a soldagem, juntamente com os gases produzidos pelo revestimento do eletrodo formam bolhas de gases que protegem o ambiente de soldagem. TSAI e MASUBUCHI (1977) reportaram que as bolhas de gases sempre protegem o arco e se movem com a mesma velocidade e na mesma direção do eletrodo.

A soldagem por eletrodo revestido ao ar tem um tempo de resfriamento de 800 °C para 500 °C, $\Delta t_{8/5}$, na faixa de 8 a 16 segundos, enquanto que a soldagem molhada por eletrodo revestido apresenta essa faixa entre 1 a 6 segundos, dependendo da energia de soldagem (de 0,8 a 3,6 kJ/mm) e da espessura da chapa soldada (CHRISTENSEN, 1983) (HAUSI e SUGA, 1980) (TSAI e MASUBUCHI, 1979).

O aumento na taxa de resfriamento proporciona maior formação de martensita na zona afetada pelo calor em aços de baixo carbono soldados em ambiente molhado e a dureza máxima da linha de fusão normalmente excede 400 Vickers. O aumento da concentração de martensita na região de grãos

grossos da zona termicamente afetada pelo calor aumenta a susceptibilidade à trinca por hidrogênio. Uma fórmula para calcular o carbono equivalente é apresentada na EQ. 2.1 (ASM, 1993).

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{\%(Ni + Cu)}{15} \quad \text{EQ. 2.1}$$

Os principais problemas associados com a soldagem subaquática molhada são (LIU et al 1994):

- No metal de solda:
 - Porosidade,
 - Perda de elementos de liga,
 - Trinca por hidrogênio,
 - Trincas de solidificação
- No metal de base:
 - Trincas na zona afetada pelo calor

Uma vez que o objetivo desse trabalho é avaliar a porosidade no metal das soldas molhadas, o problema de porosidade do metal de solda será focado na discussão que se segue.

2.3.1. Porosidade em soldas molhadas

Uma vez que o aumento da porosidade em soldagem está diretamente ligado à deterioração das propriedades mecânicas do metal de solda, tais como resistência e tenacidade, a porosidade é considerada um dos maiores problemas encontrados em soldagem subaquática molhada. Profundidade de soldagem, tipo de revestimento do eletrodo, polaridade e corrente de soldagem, modo de transferência de metal e estabilidade do arco elétrico são fatores que afetam a porosidade do metal de solda.

LIU et al (1994a) afirmaram que a influência da porosidade no metal de solda é semelhante ao que acontece em aços sinterizados, em que a porosidade leva à redução dos limites de escoamento e de resistência, de ductilidade e de tenacidade. Os mesmos autores também 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 no metal de solda em soldagem molhada é uma

característica especificada pela ANSI/AWS D3.6-83, que classifica as soldas subaquáticas nos tipos A, B, C e O.

A porosidade do metal de solda está relacionada à três principais mecanismos que envolvem os gases da poça de fusão. Ela é dada pela soma entre os gases que são gerados e os que são transportados para a poça de fusão, subtraído dos gases que escapam antes da solidificação do metal de solda. A quantidade de gases que escapam do metal de solda depende de alguns fatores como, por exemplo, o tipo de escória gerada pelo processo, o fluxo de metal líquido e a geometria da poça de fusão.

O processo de formação de poros no metal de solda pode resultar da supersaturação dos gases dissolvidos na poça de fusão ou do transporte de gases da ponta do eletrodo, produzidos por reações químicas, para a poça. Ambos os mecanismos podem ocasionar no aprisionamento de gases no metal solidificado. No primeiro caso, a porosidade fica relacionada principalmente à composição química do metal de base, e no último ao metal de adição.

A natureza e a quantidade de poros presente no metal de solda envolvem no mínimo quatro processos competitivos dependentes do tempo, tais como (TREVISAN et al, 1990) nucleação, crescimento, transporte e coalescência dos poros. Dessa forma, a presença ou ausência, e o tamanho dos poros no metal de solda depende do tempo de solidificação do metal fundido. Em soldas feitas ao ar, por exemplo, o tempo de solidificação é suficiente para proporcionar o escape dos gases do metal de solda. No caso das soldas molhadas, em que o tempo de resfriamento é de três a oito vezes menor (como discutido anteriormente) os poros nucleiam, crescem, porém muitas das vezes não têm tempo para escapar do metal de solda antes da solidificação, formando porosidade no metal solidificado.

Evidenciando os diferentes mecanismos de formação da porosidade, que dependem da pressão hidrostática, SUGA e HASUÍ (1986) identificaram dois tipos básicos de poros. Os que apresentam morfologia aproximadamente esférica e são causados pelo hidrogênio concentrado na frente de solidificação, ocorrendo na faixa de pressão entre 0,5 e 2,0 kgf/cm² (pressão manométrica). E os 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. Essa diferença é causada pela concentração de hidrogênio no metal líquido que aumenta com o aumento da pressão hidrostática.

SUGA e HASUÍ (1986) reportaram a variação da porosidade em função da profundidade de soldagem, e mostraram que os poros começam a formar a partir de 50 kPa e aumentam com o aumento da profundidade de soldagem, como mostra a FIG. 2.4. A ausência de porosidade em soldas feitas em

profundidades inferiores a 50 kPa pode estar relacionada com a baixa pressão parcial de hidrogênio e o baixo teor de oxigênio no metal de solda em baixas profundidades (PESSOA, 2007).

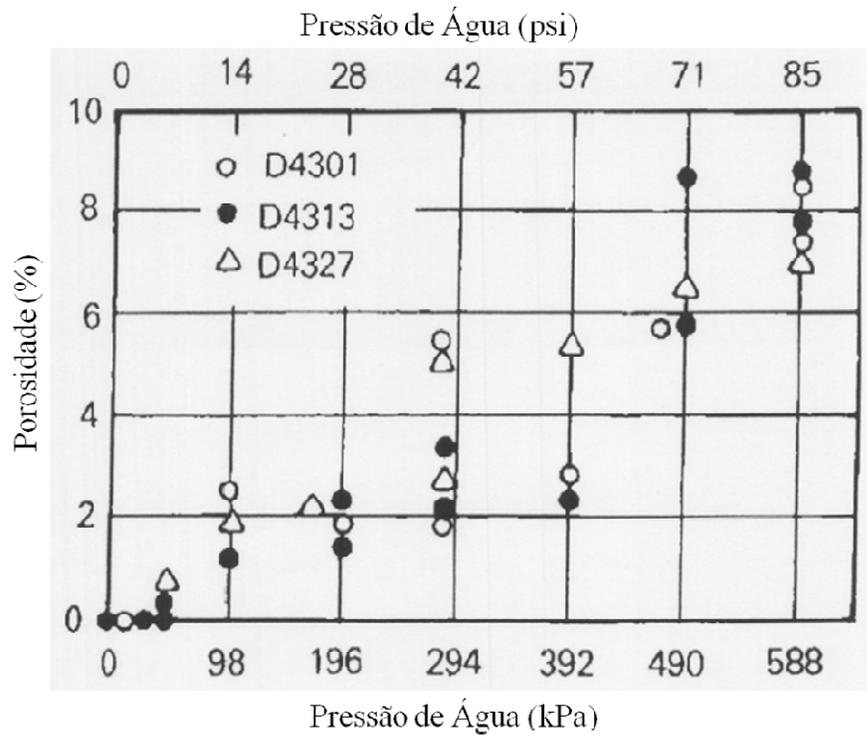


Figura 2.4. Efeito da pressão na porosidade do metal de solda (SUGA e HASUÍ, 1986) (ASM)
(10 m de profundidade \Leftrightarrow 98,1 kPa = 14,2 psi).

A condição física necessária para nucleação dos poros é que a soma da pressão parcial dos gases solúveis deve exceder a soma dos seguintes fatores (PESSOA, 2007):

$$P_g > P_a + P_h + P_b \quad \text{EQ. 2.2}$$

onde P_b é obtido através da seguinte Equação:

$$P_b = \frac{2\gamma}{r} \quad \text{EQ. 2.3}$$

Em soldagem subaquática, P_h é o termo controlador do lado direito na EQ. 2.2, uma vez que ele está diretamente relacionado à profundidade de soldagem (GRUBBS et al, 1996). Com o aumento da profundidade de soldagem, a pressão hidrostática (P_h) aumenta, dificultando a formação dos poros em teoria. Porém, como mostrado por SUGA e HASUÍ (1986), o aumento da profundidade promove aumento da porosidade. Não existe nenhum estudo que comprove o real motivo dessa discordância. PESSOA (2007) atribuiu o fato do aumento da porosidade com a profundidade ao aumento dos teores de oxigênio e hidrogênio na atmosfera do arco elétrico. Segundo ele, para que a porosidade aumente com o aumento da pressão, é necessário que a quantidade de oxigênio e hidrogênio no arco elétrico seja mais considerável do que o aumento da pressão.

Vários pesquisadores analisaram a composição dos gases contidos nos poros, em soldagem subaquática molhada, TAB. 2.1. SUGA e HASUÍ (1986) analisaram os poros de soldas feitas com eletrodos ricos em rutílo, ilmenita e ferro/óxido de ferro. ANDO e ASAHANI (1983) apud ROWE (1999) realizaram soldas com três tipos de eletrodos: óxido de ferro/pó de ferro, altos teores de óxido de titânio e eletrodos ilmeníticos, em três diferentes profundidades. LIU e OLSON (1995) usaram a termodinâmica para determinar a quantidade de gases que formam poros em aços estruturais soldados em função da profundidade de soldagem, assumindo que CO e H₂ são os únicos gases que formam poros nas soldas em aço. A quantidade calculada de CO formando poros no metal de solda é maior do que os valores relatados na literatura.

A variação na composição química das bolhas indica uma ampla natureza dos processos químicos associados à soldagem subaquática molhada. Provavelmente isso está relacionado às variações na composição do revestimento do eletrodo, na energia de soldagem e na profundidade de soldagem.

Tabela 2.1. Composição de gases medida nos poros em solda molhada.

PESQUISADORES	H₂ (%)	CO (%)	CO₂ (%)	Outros (%)
SUGA e HASUI, 1986	96	0,4	0,06	-
CHEW, 1973	62 a 82	11 a 26	4 a 6	-
SAPIRO apud PEREZ, 2007	45	43	8	4
ANDO e ASAHANI, 1983 apud ROWE, 1999	>99	-	-	-
LIU e OLSON, 1995*	16 a 22	84 a 78	-	-

*Valores calculados

SANTOS et al (1992) desenvolveram um modelo para explicar o surgimento de porosidade em soldas, o qual se baseia na diferença entre a solubilidade do hidrogênio no ferro líquido e no ferro no estado sólido. A FIG. 2.5, mostra os valores de solubilidade do hidrogênio no ferro. 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) (GRONG, 1997).

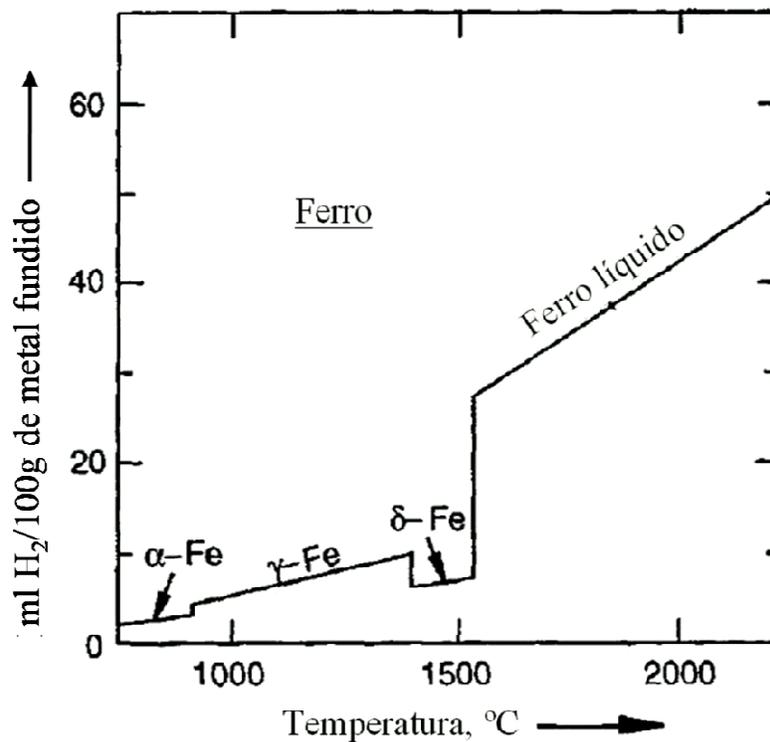


Figura 2.5 - Solubilidade do hidrogênio (em mililitros de H₂ por 100 gramas de metal fundido) no ferro em função da temperatura (GRONG, 1997 apud PESSOA, 2007).

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

PÉREZ (2007) desenvolveu um modelo para a formação de porosidade em soldas de aço utilizando GMAW em atmosfera oxidante, e concluiu que a porosidade é produzida principalmente pelo gás CO, transportado dentro das gotas que se destacam da ponta do eletrodo para a poça de fusão. Assim, gás CO é formado pela reação entre o carbono do metal de adição e o oxigênio presente nos óxidos na metálicos na ponta do eletrodo, aprisionado e transportado pelas gotas de metal fundido. Ele também concluiu que a porosidade macroscópica não é causada pelo gás absorvido na poça de fusão, ao contrário do que é regido pelo atual modelo de formação de porosidade. De acordo com o atual modelo, esse gás é rejeitado do metal sólido para o metal líquido, supersaturando o metal líquido e promovendo a nucleação e crescimento das bolhas de gases.

PESSOA (2007), ao observar que a porosidade varia ao longo do comprimento do cordão de solda, analisou a composição química ao longo do comprimento. Assim, ele encontrou que o teor de carbono aumenta do início para o final do cordão de solda. Associado a isso, observou também que no início, o número de curtos-circuitos e a instabilidade do arco são maiores do que no final do cordão. Assim, ele concluiu que no início do cordão de solda, a oxidação do carbono através do arco elétrico é maior e, conseqüentemente, o teor de carbono no metal de solda é menor, o que resultou em maior porosidade no metal de solda na parte inicial do cordão.

Um das maneiras de minimizar a porosidade em soldas molhadas pode ser pela redução de hidrogênio e CO no metal fundido, adicionando elementos desoxidantes, formadores de hidretos e modificadores do potencial de oxigênio no revestimento do eletrodo. CHEW (1973) declarou que o hidrogênio difusível do metal de solda pode ser reduzido pela adição de carbonato de cálcio (CaCO_3) no revestimento do eletrodo. A decomposição do CaCO_3 no arco produz gás CO, que reduz a pressão parcial do hidrogênio na atmosfera de soldagem, reduzindo o hidrogênio difusível no metal de solda. Baseado nessa informação, SANCHEZ (1994) e SANCHEZ e LIU (1995) relataram o efeito da adição de carbonato de cálcio no revestimento de eletrodos rútilicos na porosidade do metal de solda, em soldas feitas a 10 metros de profundidade, como mostrado na FIG. 2.6. Utilizando 12% de CaCO_3 , foi

obtido 1% de porosidade, o que é uma melhora, comparado com o trabalho realizado por SUGA E HASUÍ (1986). Foi apresentado também nessas referências a dependência da porosidade com relação ao produto $[C][O]$, em que a porosidade diminui com a diminuição do produto $[C][O]$. Considerando essa informação, e sabendo que no ambiente molhado tem-se grande disponibilidade de oxigênio, uma opção para a diminuição da porosidade é através da diminuição do carbono no sistema. PÉREZ (2007) obteve 0,33% de porosidade no metal de solda a 50 metros de profundidade utilizando eletrodos experimentais com alma de baixíssimo teor de carbono (0,005%) e adição de elementos desoxidantes no revestimento.

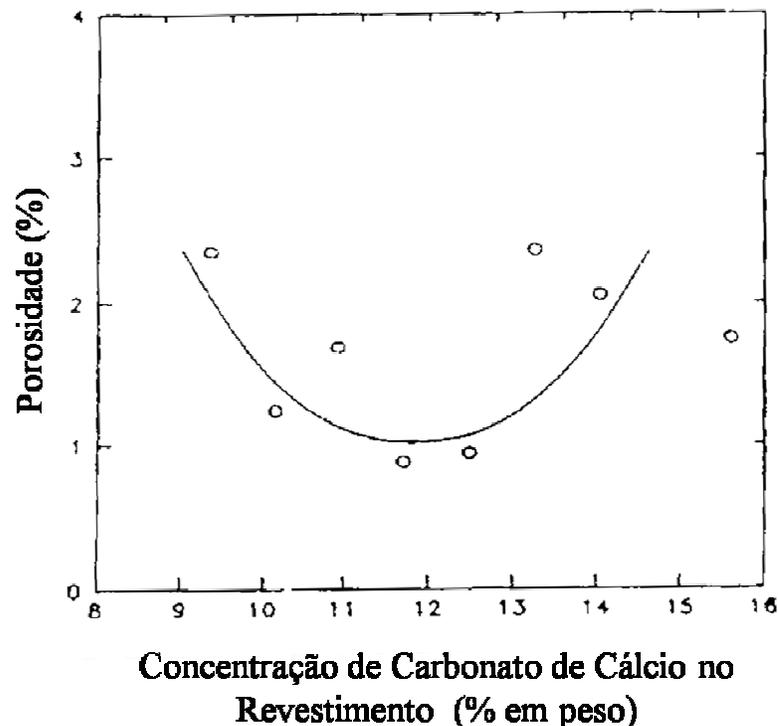


Figura 2.6. Variação da porosidade no metal de solda em função da adição de carbonato de cálcio no revestimento de eletrodos E6013 (SANCHEZ, 1994) (SANCHEZ et al , 1995).

ROWE (1999) investigou o efeito da adição de elementos de liga no revestimento do eletrodo na porosidade do metal de solda. As FIG.'s 2.7 e 2.8 mostram os resultados obtidos, onde vê-se a tendência da diminuição da porosidade com o aumento de ferro-manganês no eletrodo. Manganês é conhecido por ser um forte desoxidante, o que faz com que a concentração de oxigênio no metal fundido diminua, e, conseqüentemente, diminua a formação de CO e de porosidade no metal de solda.

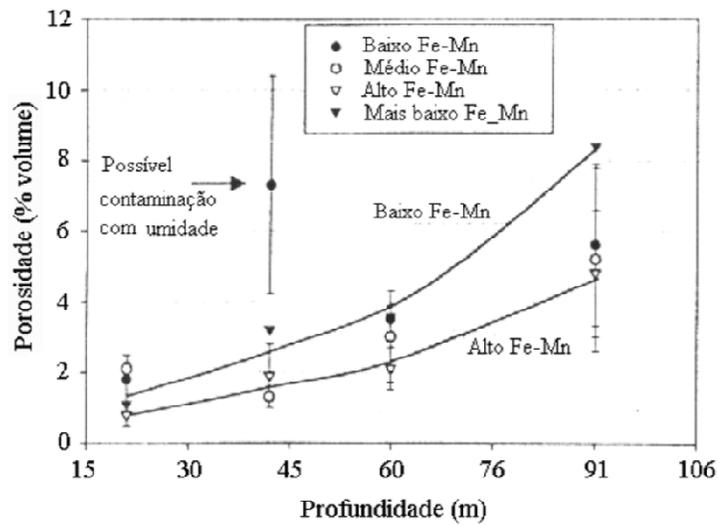


Figura 2.7. Porosidade no metal de solda em função da profundidade de soldagem e da adição de ferro-manganês ao revestimento de eletrodos rútilicos (ROWE, 1999).

A FIG. 2.7 mostra claramente a diminuição da porosidade com o aumento da concentração de ferro-manganês no revestimento do eletrodo.

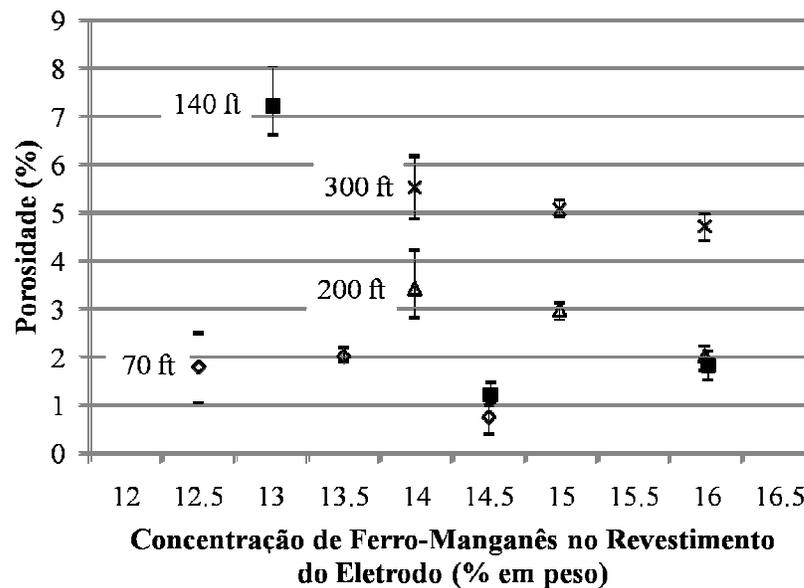


Figura 2.8. Porosidade em soldas molhadas depositadas utilizando eletrodo revestido com diferentes concentrações de ferro-manganês em quatro profundidades (gráfico plotado por PÉREZ, 2007, com dados de ROWE, 1999).

Ao contrário da adição de ferro-manganês, a adição de titânio no revestimento provoca aumento da porosidade, como mostrado pela FIG. 2.9.

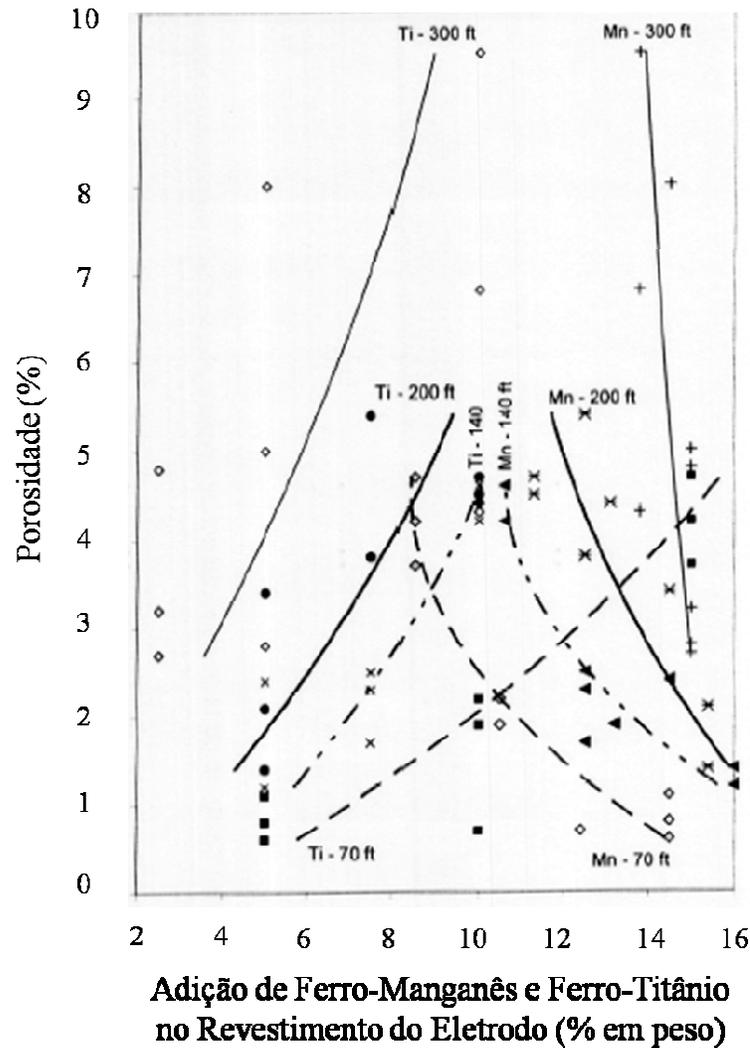


Figura 2.9. Porosidade em soldas molhadas depositadas em diferentes profundidades usando eletrodo revestido com a adição de ferro-manganês, ferro-titânio (gráfico plotado por PÉREZ, 2007 com dados de ROWE, 1999).

A diferença do efeito na porosidade entre a adição de manganês e de titânio foi atribuída à basicidade da escória. Foi relatado também que eletrodos com alta adição de manganês apresentaram escória com fluidez excessiva, fina e quebradiça e de difícil remoção. Por outro lado, eletrodos com

adição de titânio-boro produziram uma camada de escória grossa e coerente, de fácil destacabilidade (PÉREZ, 2007).

A FIG. 2.10 mostra a variação da porosidade com a concentração de oxigênio no metal de solda. Vê-se, apesar da grande dispersão dos dados, a tendência da porosidade aumentar com o aumento da concentração de oxigênio no metal de solda. O autor não expôs a influência do hidrogênio na porosidade.

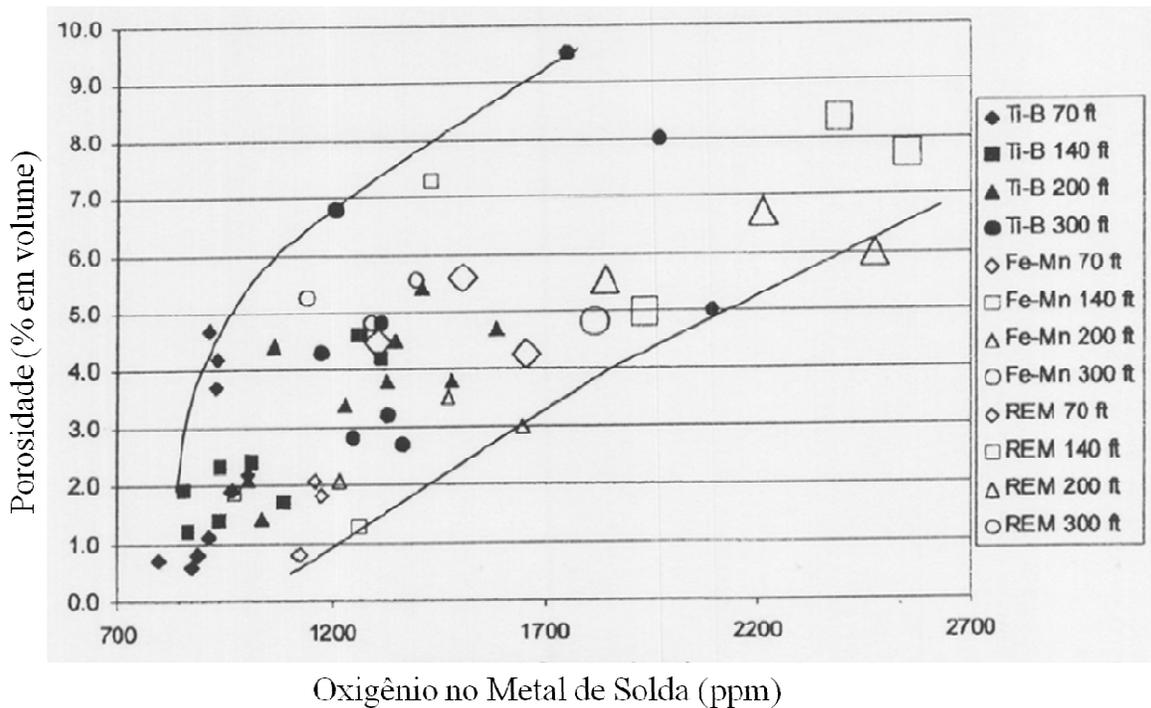


Figura 2.10. Porosidade como função do oxigênio no metal de solda, medido em soldas molhadas em quatro diferentes profundidades usando eletrodo com adição de manganês, titânio-boro e terras raras (REM). Os símbolos maiores do gráfico correspondem às soldas feitas com terras raras no eletrodo (ROWE, 1999).

BRACARENSE et al (2003) e LIU e PÉREZ (2004) avaliaram o efeito da polaridade do eletrodo, da composição química do metal de base e da profundidade de soldagem na porosidade de soldas molhadas. Cordões sobre chapa foram depositados em três materiais diferentes, aço ASTM A-36, A572 Gr. 50 e API 5L Gr. B. Foram utilizados três eletrodos comerciais, E6013, E7018 e E7024. As soldas foram realizadas em duas diferentes profundidades, 50 e 100 metros, utilizando um sistema

de soldagem por gravidade e duas diferentes polaridades do eletrodo, eletrodo positivo e negativo. Os resultados são mostrados na TAB. 2.2. Note o grande aumento da porosidade com a mudança da polaridade de eletrodo positivo para negativo usando eletrodo rutílico E6013. O mesmo não pode ser dito para os outros eletrodos, evidenciando que a relação entre a polaridade do eletrodo e a qualidade da solda depende de fatores como o tipo do eletrodo, como já discutido anteriormente.

Tabela 2.2. Porosidade (%) medida na seção transversal dos cordões sobre chapa. (BRACARENSE et al, 2003) (LIU et al, 2004).

*DCEP – Eletrodo Positivo

+DCEN – Eletrodo Negativo

Eletrodo - Polaridade	Aços					
	ASTMA-36		ASTMA572 Gr. 50		API 5L Gr. B	
	50 m	100m	50 m	100 m	50 M	100 m
E6013-DCEP*	1.2	8.4	1.8	6.1	0.6	8.8
E7018-DCEP	17.8	20.2	10.1	18	8.8	25.4
E7024-DCEP	7.3	11.6	6.2	10.9	8.3	13.4
E6013-DCEN+	9.8	14.9	5	13.4	8.3	16.6
E7018-DCEN	13.8	26.4	5.7	10.6	14.8	24.4
E7024-DCEN	5.4	22.8	5.6	10.1	3.5	17.8

No mesmo trabalho, LIU e PÉREZ (2004) analisaram os sinais de tensão das soldas realizadas, tentando definir o modo de transferência de metal em cada uma delas. Eles concluíram que maior porosidade no metal de solda está relacionada com transferência de metal por curto-circuito e com maior comprimento do arco, no caso de transferência globular. O modo de transferência por curto-circuito foi observado nas soldas feitas com o eletrodo E6013 usando polaridade direta e com o eletrodo E7018 nas duas polaridades. Usando polaridade inversa, o eletrodo E6013 apresentou transferência globular com um comprimento do arco mais curto do que o eletrodo E7024, que também apresentou transferência globular, porém um comprimento do arco muito maior.

Com esse trabalho, LIU e PEREZ (2004) mostraram que conhecer os modos de transferência de metal é muito importante, uma vez que este está relacionado com a estabilidade do arco, que por sua

vez influencia na quantidade de respingos, na qualidade do processo de soldagem e do cordão de solda, na eficiência da proteção gasosa e na velocidade de soldagem.

Basicamente, os modos de transferência de metal podem ser caracterizados pelo tamanho das gotas de metal que se destacam da ponta do eletrodo. No modo de transferência por spray, as gotas são do mesmo tamanho ou menor do que o diâmetro do eletrodo. Transferência globular é caracterizada por apresentar gotas de tamanho maior do que o diâmetro do eletrodo. Quando as gotas crescem a ponto de tocarem a poça de fusão antes de se destacarem da ponta do eletrodo, caracteriza o modo de transferência por curto-circuito. Pode ocorrer também a transferência por explosão, que é caracterizada pela explosão das gotas devido a altas pressões de gases dentro delas, ejetando respingos dentro e fora da poça de fusão.

A TAB. 2.3 mostra os modos de transferência de metal de acordo com o instituto internacional de soldagem (IIW).

Tabela 2.3. Modos de transferência de metal (IIW, 1977).

Designação do modo de transferência metálica.		Exemplo de processo de soldagem.	
Transferência em voo livre	Transferência Globular	Transferência por gotas	MIG/MAG com densidade de corrente baixa
		Transferência por repulsão	MAG com 100%CO ₂
	Transferência por pulverização	Transferência por projeção	MIG com Ar e MAG com Ar e até 15% CO ₂ ou 5% de O ₂
		Transferência por pulverização axial.	MIG/MAG com densidade de corrente maior
		Transferência por pulverização rotacional	MIG/MAG com densidade de corrente elevada, MIG plasma
Transferência por explosão		Eletrodo revestido, MAG com CO	
Transferência por contato	Transferência por curto-circuito		MAG com arco curto
	Transferência por contato ininterrupto		Soldagem com adição de metal (TIG)
Transferência guiada pela escória	Transferência guiada pela parede		Soldagem com arco submerso
	Outros modos		Eletrodo revestido, eletrodo tubular.

Em soldagem por eletrodo revestido, os modos de transferência mais comuns são globular/explosão, curto-circuito e protegido pela escória (BRANDI et al, 1991) (XU, 1994) (PISTORIOS e LIU, 1997) (PEREZ, 2003).

O destacamento das gotas da ponta do eletrodo está diretamente relacionado com as forças que agem sobre elas, tanto no sentido favorável quanto no sentido contrário ao destacamento. Em soldagem na posição plana as forças a favor do destacamento são força gravitacional (F_g), força de arraste (F_d) e força eletromagnética (F_{em}). As forças contrárias ao destacamento são força de tensão superficial (F_γ) e forças devido ao jato de vapor do arco (F_v) (LANCASTER, 1984) (NORRISH, 1992). A FIG. 2.11 mostra um esquema ilustrativo das forças agindo em uma gota presa à ponta do eletrodo.

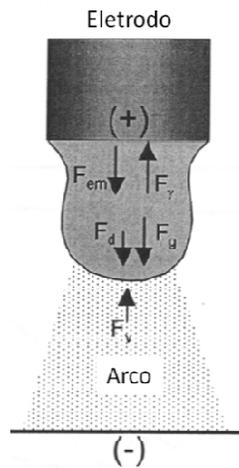


Figura 2.11. Esquema ilustrativo das forças agindo em uma gota na ponta do eletrodo (PEREZ, 2007).

Considerando as forças descritas acima, o destaque da gota só acontecerá quando a soma das forças que agem a favor do destacamento for maior do que das forças que agem contra, como representado pela EQ. 2.4 (LANCASTER, 1984) (NORRISH, 1992).

$$F_g + F_d + F_{em} \geq F_\gamma + F_v \quad \text{EQ. 2.4}$$

A FIG. 2.12 mostra a variação das forças que agem sobre as gotas com a corrente. A força devido à tensão superficial é considerada constante, enquanto que a força de arraste e a força gravitacional tendem a diminuir com o aumento da corrente e a força eletromagnética tende a aumentar com o aumento da corrente. Apesar disso, a força resultante do lado esquerdo da equação será sempre maior que a do lado direito. Isso significa que as gotas sempre irão se destacar da ponta do eletrodo. Por outro lado, percebe-se ainda que a força eletromagnética aumenta com a corrente. Esta força

controla o efeito pinch e este a velocidade de destacamento. Assim, quanto maior a corrente, maior a velocidade de destacamento da gota, porque maior será o efeito pinch e, portanto, maior será a forma eletromagnética e menor o tamanho da gota.

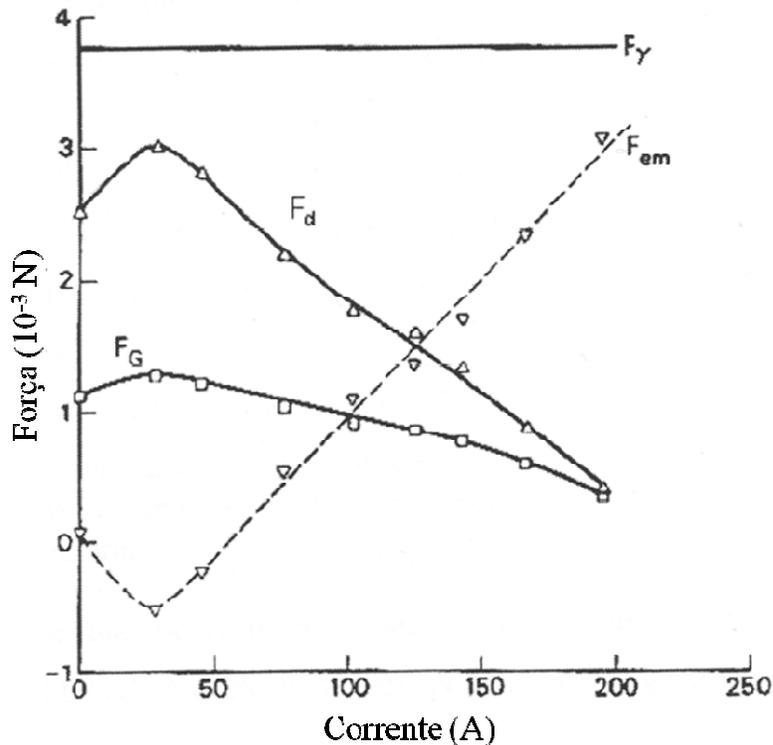


Figura 2.12. Efeito da corrente de soldagem nas forças que agem sobre as gotas (LANCASTER 1984).

A força gravitacional (F_g), dada pela EQ. 2.5, é proporcional ao peso da gota. Assim, durante o crescimento da gota, maior é a massa, e portanto maior é a força gravitacional, a qual desempenha assim um importante papel a favor do destaque da gota. Porém, considerando a possibilidade de haver vapor de gás em altas temperaturas dentro da gota, nessa condição a força gravitacional se torna menor do que a força devido ao jato de vapor de gases do arco, dificultando o destaque da gota (PEREZ, 2007).

$$F_g = mg$$

EQ. 2.5

A EQ. 2.6 representa a força de arraste (F_d), que aumenta com o aumento da velocidade do gás de proteção e do tamanho das gotas. Se a gota contém gases em seu interior (aumentando o seu

tamanho) a força de arraste se torna maior, facilitando o destaque da gota. Porém a força de arraste é desconsiderada em soldagem por eletrodo revestido (PEREZ, 2007).

$$F_d = 0,5\pi V^2 \rho r^2 C \quad \text{EQ. 2.6}$$

A força eletromagnética é dada pela EQ. 2.7.

$$F_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_a^2}{R}\right) \quad \text{EQ. 2.7}$$

A força eletromagnética é diretamente proporcional ao quadrado da corrente, assim o aumento da corrente produz um grande aumento na força eletromagnética, facilitando o destacamento da gota.

A força devido a tensão superficial é mostrada na EQ. 2.8.

$$F_\gamma = 2\pi r_w \gamma \left(\frac{r_w}{c}\right) \quad \text{EQ. 2.8}$$

A tensão superficial é a principal força que age contra o destaque da gota, e quanto maior o diâmetro do eletrodo, maior será a força devido à tensão superficial. Por esse motivo, é preferível que se usem eletrodos de menores diâmetros, favorecendo o destaque da gota, a qual, por ser menor, também promoverá menor formação de porosidade. A presença de oxigênio na atmosfera do arco reduz a tensão superficial do aço, facilitando o destaque da gota. Porém, oxigênio no arco promove a formação de CO e CO₂ e, conseqüentemente, seu aprisionamento na gota, reduzindo a força gravitacional (PEREZ, 2007).

Radiografias feitas nas soldas em chanfro mostraram maior porosidade no início dos cordões em relação ao final. Algumas possíveis razões para essa variação são umidade na ponta do eletrodo, aquecimento do eletrodo e estabilização da máquina de solda nos parâmetros definidos. LIU e PÉREZ (2006) relataram porosidades de soldas molhadas feitas a 150 metros com os eletrodos E6013 e E7024, em metais de base aços A-36 e API 5L Gr. B. A FIG. 2.13 mostra macrografias da seção transversal das soldas feitas em chanfro com o eletrodo E6013, em que o valor da porosidade relatado foi de 16% no início e 7% no final.

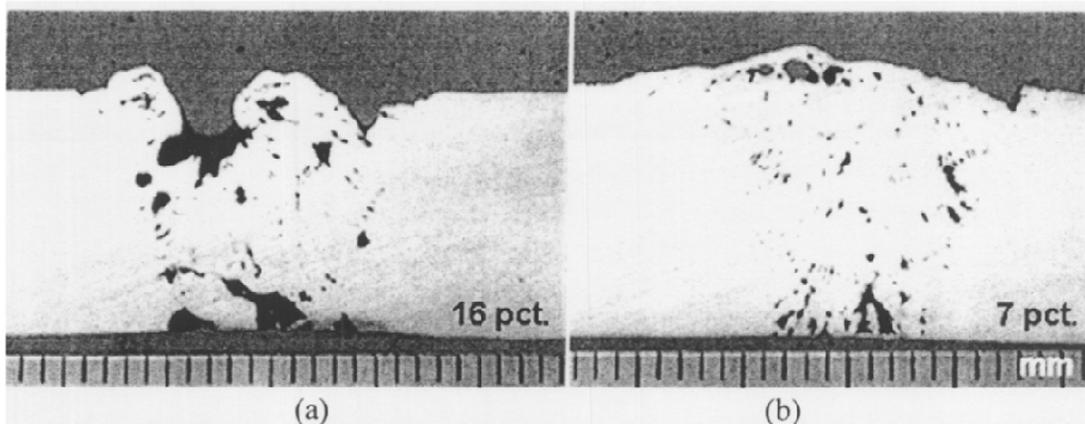


Figura 2.13. Macrografias mostrando a seção transversal no início (a) e no final (b) de uma solda molhada em chanfro com o eletrodo E6013 em aço A-36 (LIU e PÉREZ, 2006).

Um fator importante, relatado por PESSOA (2003) que influencia a porosidade do metal de solda é a estabilidade do arco elétrico. Segundo ele, o aumento da profundidade (pressão) provoca a constrição do arco elétrico deixando-o mais instável. Este 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 e tendo como consequência o aprisionamento de poros e escória no metal de solda.

Em relação à profundidade, a estabilidade do arco elétrico é ruim em baixas profundidades (1,5 a 3,0 metros), melhora significativamente a 6,0 m e volta a deteriorar-se em grandes profundidades (LIU et al, 1994a). Também 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, promovendo uma melhor “rigidez” (diferença entre a taxa de fusão da alma e do revestimento do eletrodo) do arco elétrico.

PESSOA et al (2003) analisaram a porosidade no metal de solda em função da corrente de soldagem para três diferentes eletrodos (E6013, E7018 e E7024), em duas profundidades diferentes (50 e 100 metros) usando eletrodo positivo. Em alguns casos, a porosidade aumentou usando baixa corrente, porém na maioria dos casos a porosidade aumentou usando alta corrente de soldagem, como mostra a FIG. 2.14 e FIG. 2.15. Os menores valores de porosidade foram observados em valores intermediários de corrente, onde, provavelmente o arco de soldagem é mais estável. Possíveis razões

para o comportamento observado são que usando baixa corrente de soldagem, a escória pode não ter alcançado a viscosidade ótima para proteger a solda e permitir a desgaseificação. Em altas correntes de soldagem, a geração de oxigênio e hidrogênio é maior, aumentando a quantidade de gás aprisionado dentro das gotas e aumentando a porosidade no metal de solda.

A porosidade no metal de solda em soldagem molhada também pode ser minimizada através da seleção correta dos parâmetros de soldagem. Baixos valores de corrente utilizando polaridade inversa (eletrodo positivo), altos valores de corrente utilizando polaridade direta (eletrodo negativo), pequeno comprimento do arco e altas velocidades de soldagem promovem menor formação de porosidade (ASM, 1993).

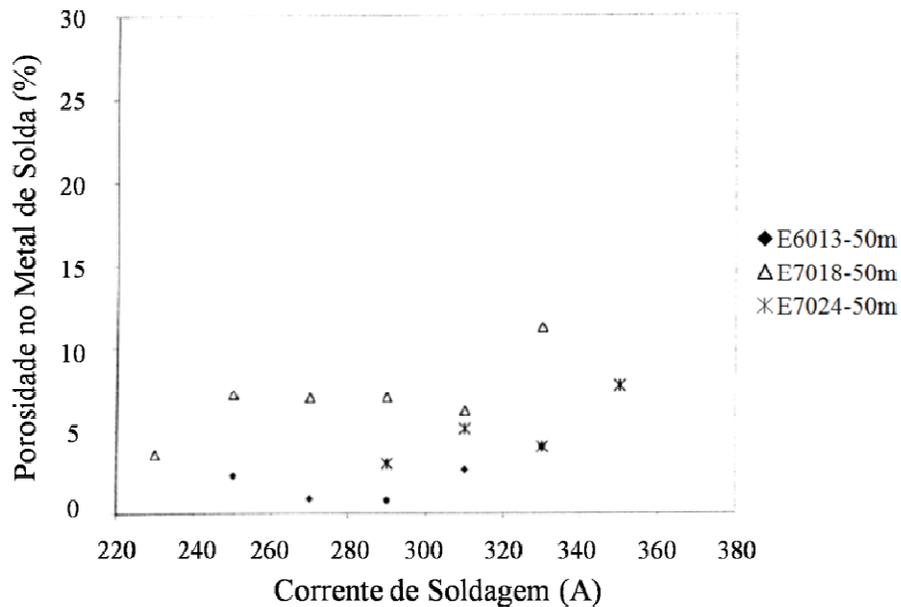


Figura 2.14. Porosidade no metal de solda molhada versus corrente de soldagem de três eletrodos comerciais diferentes a 50 metros de profundidade (PESSOA et al, 2003).

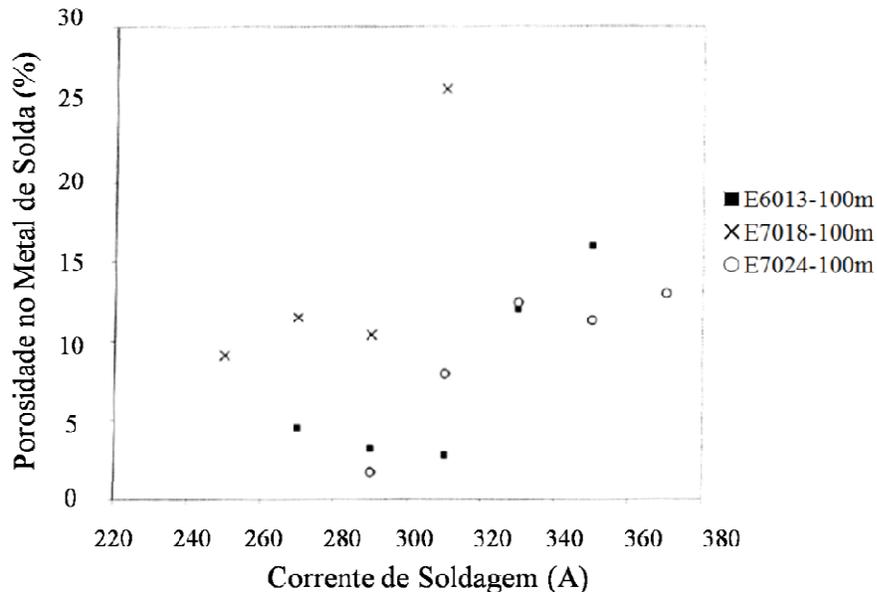


Figura 2.15. Porosidade no metal de solda molhada versus corrente de soldagem de três eletrodos comerciais diferentes a 100 metros de profundidade (PESSOA et al, 2003).

2.3.2. Consumíveis em soldagem subaquática

Vários diferentes tipos de eletrodos comerciais e experimentais estão sendo usados e testados em soldagem subaquática. Alguns deles específicos para soldagem ao ar. Esses eletrodos são normalmente agrupados em três principais categorias, de acordo com o tipo de material de adição utilizado, que são ferrítico, austenítico e a base de níquel. Geralmente, eletrodos ferríticos são usados para soldagem de aços baixo carbono, com carbono equivalente (CE) menor do que 0,4%. Eletrodos austeníticos e a base de níquel são usados em aços alto carbono. O foco desse trabalho são os eletrodos de base ferrítica, especialmente os eletrodos rutilicos.

O revestimento do eletrodo desempenha um importante papel em prol da melhora na qualidade das soldas subaquáticas. O metal de solda obtido com eletrodos rutilicos apresenta maior tenacidade e resistência à tração em relação aos eletrodos oxidantes. As propriedades mecânicas inferiores do metal de solda desses eletrodos estão relacionadas ao baixo teor de Mn, C e Si, devido ao 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. Já um eletrodo rutilico deposita soldas com teores típicos de 0,1% de C, 0,1% de Si e 0,4% de Mn em peso. Eletrodos

rutílicos produzem metal de solda com elevado teor de hidrogênio difusível (~90ml/100g), enquanto eletrodos oxidantes apresentam teores consideravelmente mais baixos (~15ml/100g), como mostra a FIG. 2.16 (GOOCH, 1983).

De uma maneira geral, as pesquisas que promovem alterações e adaptações no revestimento de eletrodos rutílicos para soldagem subaquática têm como objetivo principal reduzir a quantidade de hidrogênio difusível aprisionado no metal de solda (PESSOA, 2007). 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 a tenacidade do metal de solda (FILHO et al, 2003).

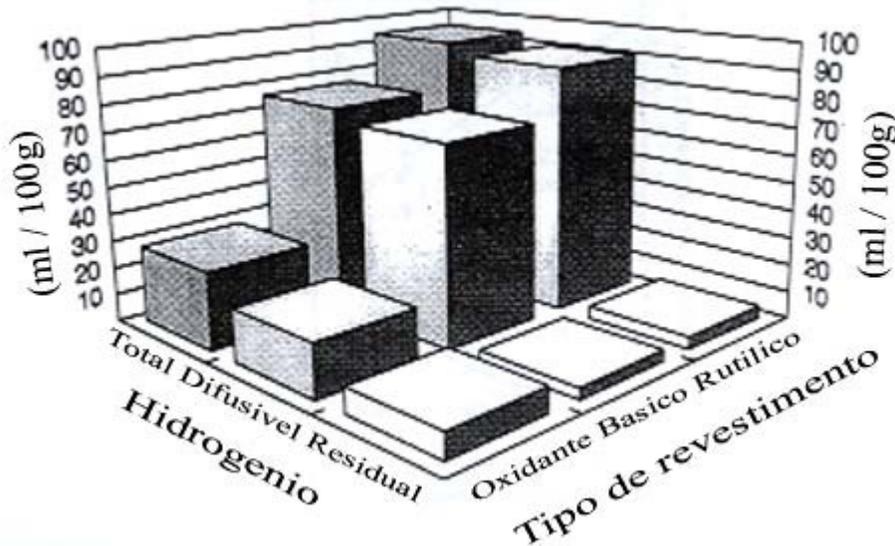


Figura 2.16. Variação do teor de hidrogênio no metal de solda para eletrodos oxidante, básico e rutílico (GOOCH, 1983).

Eletrodos rutílicos vêm sendo muito usados em soldagem molhada, apresentando resultados aceitáveis. Eles apresentam soldas com boa estabilidade de arco, boa morfologia do cordão, relativamente baixa porosidade, porém microestrutura diferente da desejável.

PESSOA (2007) avaliou a variação nas características e propriedades das soldas realizadas com eletrodos rutílico e básico. Observou que a porosidade, a composição química, as propriedades mecânicas do metal de soldas molhadas e o modo de transferência de metal variam ao longo do cordão

de solda. As soldas tendem a ter melhor qualidade no final do cordão do que no início, e isso foi atribuído à mudança no modo de transferência do metal, que tende a ter mais curto-circuito, e além da maior instabilidade do arco no início do cordão. Concluiu-se também que o eletrodo E6013 apresentou cordões com melhor qualidade do que os eletrodos E7018 e E7024.

PÉREZ (2003) testou além de eletrodos rútilicos experimentais com a adição de níquel no revestimento, eletrodos comerciais E6013, E7018 e E7024. Concluiu que os eletrodos rútilicos (E6013 e E7024) são apropriados para soldagem molhada, ao contrário do eletrodo E7018, o qual apresentou dificuldade de abrir e manter o arco elétrico, instabilidade do arco, e poros maiores e mais próximos da linha de fusão. Eletrodos experimentais com adições de 3,0 % em peso de níquel apresentaram soldas com melhor tenacidade e microestrutura mais fina.

ROWE et al, (2001) e (2002) adicionaram manganês (Mn), titânio (Ti), boro (B) e terras raras ao revestimento de eletrodos rútilicos 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 reauecida na seção transversal mostraram que a adição de Ti e B promoveu um maior refinamento dos grãos na zona reauecida. 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, o primeiro evita que esse último seja totalmente oxidado.

SANCHEZ-OZIO (1994) concluiu que eletrodos E6013 com aproximadamente 300 ppm de titânio e 10 a 20 ppm de boro podem aumentar a ferrita acicular do metal de solda até 60 % em volume, usando energia de soldagem de 1 kJ/mm. Um mapa de contorno mostrando a variação de ferrita acicular com a concentração de titânio e boro no metal de solda é mostrado na FIG. 2.17. Ferrita acicular está associada com boas propriedades mecânicas.

Fluxos para soldagem subaquática são mais complexos do que para soldagem ao ar, uma vez que necessita de funções adicionais como redução da porosidade, redução do hidrogênio difusível e refinamento da microestrutura. A TAB. 2.4 mostra alguns minerais utilizados no revestimento de eletrodos e suas funções.

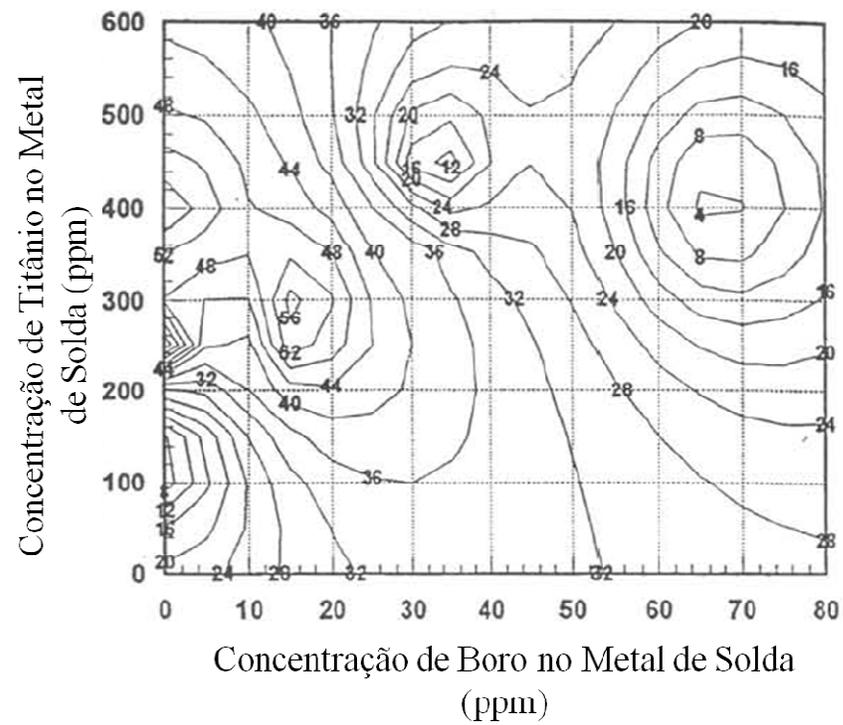


Figura 2.17. Mapa de contorno da variação de ferrita acicular com a concentração de titânio e boro no metal de solda (SANCHEZ-OZIO, 1994).

Tabela 2.4. Minerais utilizados em revestimento de eletrodos e suas funções
(X => JACKSON, 1973; B => BRACARENSE, 1994; F => PÉREZ, 2003; R => ROWE, 1999; S => SANCHEZ, 1994).

Constituintes do Revestimento	Formador de Gás	Desoxidante	Formador de Escória	Controlador da Viscosidade da Escória	Estabilizador do Arco	Elemento Ligante	Agentes Deslizantes	Elementos de Liga	Cor do Revestimento
Material Orgânico	X	X					X		
Celulose (C ₆ H ₁₀ O ₅) _x	B								
Carbonato de Cálcio, Marflux, Mármore CaCO ₃	XBF	X	X	X	X		F		
Óxido de Cálcio		X		X	X				
Fluoreto de Cálcio, Fluorita, CaF ₂	X	X	B	X					
Titânia, Rutilo TiO ₂		X	XF	X	XF				X
Óxido de Zircônio, ZrO ₂					X				
Alumina Al ₂ O ₃				X	XB				
Sílica SiO ₂		X	XB	X	X				
Óxido de Ferro, Fe ₂ O ₃		X	XB	X	X				X
Ferro Silício Fe-Si		XB	X					X	
Ferro Manganês Fe-Mn		XB	X					XF	R
Carbonato de Manganês	X	X	X						
Óxido de Sódio		X				X			
Silicato de Sódio NaSiO ₃			X	X	X	XB			
Carbonato de Potássio	X				X				
Silicato de Potássio K ₂ SiO ₃			X		XF	XB			
Titanato de Potássio 2K ₂ O.2TiO ₂					B				
Silicato de Lítio LiSiO ₃						B			
Dióxido de Manganês			X		X				X
Feldspato (K ₂ O.Al ₂ O ₃ .6SiO ₂)	B		X	X	X				
Asbestos 3MgO.4SiO ₂ .4H ₂ O			X	X	X	X			
Talco 3MgO.4SiO ₂ .H ₂ O		X	X	X	X		X		
Argila Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .2H ₂ O			X	X	X	X	X		
Pó de Ferro					X			X	
Mica K ₂ O.(3)Al ₂ O ₃ .6SiO ₂ .2H ₂ O							B		
Caulim Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .H ₂ O							B		
Fe-Ti		R						RS	
Fe-B								RS	
Ni								F	
Carboxyl Methyl Cellulose									
KOH									

2.4. Morfologia do cordão de solda

Em pesquisas realizadas em laboratório, MAZZAFERRO, (1998) apud MADATOV, (1961) comprovaram o aumento da penetração do cordão de solda com a profundidade na soldagem com eletrodos revestidos, bem como uma variação no fator de forma (largura/profundidade) de 5 para 3. SILVA e HAZLETT, (1971) encontraram um fator de forma entre 4,2 e 5,4 para soldas feitas em profundidades de 0,9 metros. PESSOA (2007) observou que as soldas feitas com o eletrodo E6013 apresentaram maior penetração em maiores profundidades de soldagem e usando polaridade direta (eletrodo negativo).

O aumento da pressão de coluna d'água com o aumento da profundidade de soldagem resulta na constricção do arco elétrico e altíssimas temperaturas no centro do arco, aumentando assim a penetração nas soldas molhadas. Esse aumento de penetração, acompanhado de uma transferência mais rápida de metal, aumentam a taxa de deposição do eletrodo, o que pode ser considerado um fator benéfico. Entretanto, se não for controlado pode provocar a perfuração do metal-base (MAZZAFERRO, 1998).

É reportado na literatura que a morfologia do cordão de solda subaquática pode influenciar a ocorrência de defeitos em soldagem, tais como mordeduras, porosidade e falta de fusão na parede do chanfro (PESSOA *et al*, 2004). Reforço e penetração excessivos, por exemplo, podem propiciar uma ausência de material na borda do cordão de solda, acarretando na formação de mordeduras. Em soldagem multipasse, a porosidade de um cordão de solda pode ser reduzida através de sua re-fusão parcial realizada pelo passe seguinte, devido ao escape dos poros da região re-fundida para a atmosfera. Uma maior penetração aumenta a porção refundida do cordão de solda anterior e, por conseguinte, diminui a porosidade (PESSOA, 2003). Deve-se ressaltar também, que soldas com maior reforço possuem um menor ângulo de molhamento com o metal de base, o que facilita a ocorrência de falta de fusão nas paredes do chanfro em soldagem multipasse. Por último, uma maior penetração do cordão de solda aumenta a proporção zona refundida/zona colunar em soldas multipasse, o que pode acarretar em melhores propriedades mecânicas da junta soldada.

A morfologia do cordão de solda é fortemente influenciada pela polaridade do eletrodo (TSAI E MASUBUCHI, 1977) e forças convectivas na poça de fusão (HEIPLE E ROPER, 1982). TSAI E MASUBUCHI (1977) propuseram que a polaridade influencia diretamente na morfologia do cordão e no comprimento do arco em soldagem subaquática molhada, como pode ser observado na FIG. 2.18. Para a polaridade inversa (DCEP), o calor é 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. Para a polaridade direta (DCEN), os elétrons bombardeiam diretamente a peça. Nesta condição, o comprimento de arco é menor, acarretando em uma menor área alcançada pelo arco, e resultando em uma menor largura, e maiores reforço e penetração em relação às soldas feitas com o eletrodo positivo (PESSOA, 2007). 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.

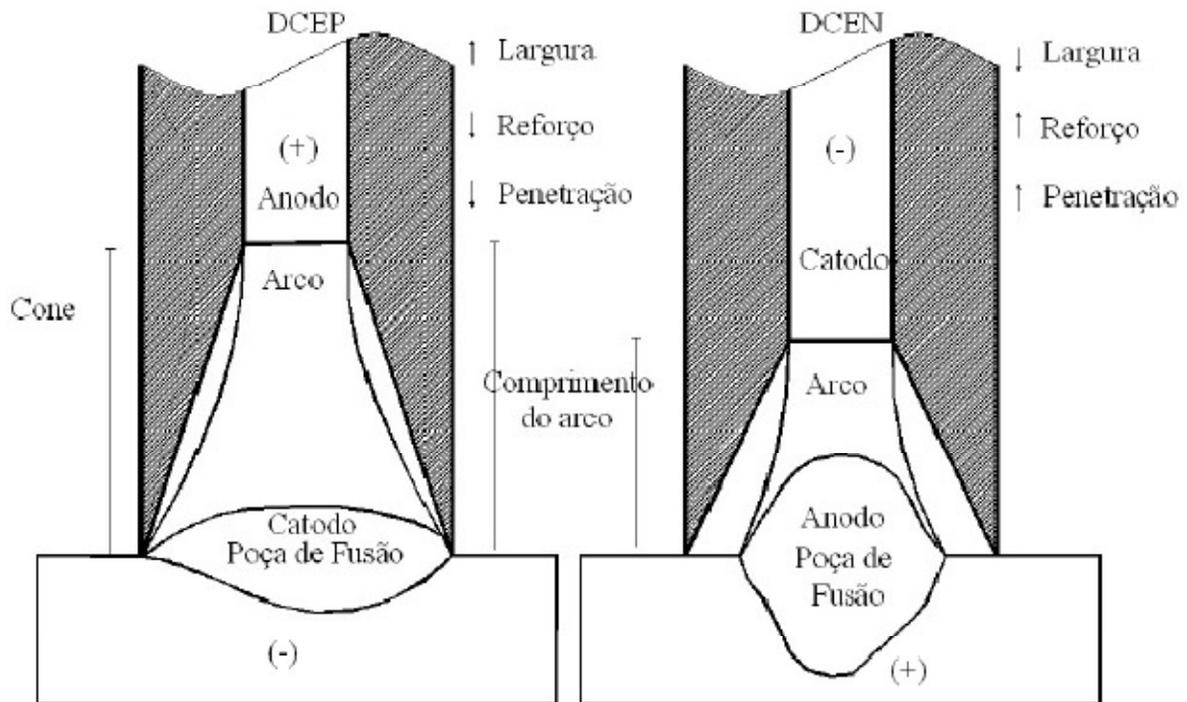


Figura 2.18. Desenho esquemático (PESSOA, 2007) mostrando o efeito da polaridade na geometria do cordão de solda e no comprimento de arco baseado no modelo proposto por TSAI E MASUBUCHI (1977).

Acerca do fluxo convectivo na poça de fusão, há vários tipos de forças que atuam no metal líquido, as quais influenciam na morfologia do cordão de solda, tais como a força de empuxo, força de Lorentz, força de arraste aerodinâmico e tensão cisalhante induzida pelo gradiente de tensão superficial na superfície da poça de fusão (Convecção de Marangoni) (KOU, 2003). HEIPLE E ROPER (1982) E KOU E LIMMANEEVICHITR (2000a) citaram que a força convectiva na poça devido ao gradiente de tensão superficial é a que mais influencia na morfologia do cordão de solda. É reportado na literatura que pequenas adições de elementos ativos, tais como enxofre e oxigênio, modificam consideravelmente a tensão superficial γ do ferro e de alguns outros metais (MILLS, 1990) (KOU E LIMMANEEVICHITR, 2000).

HEIPLE E ROPER (1982) mostraram que gradientes de tensão superficial e força de Lorentz são as principais forças que interagem para promover o escoamento do fluido na poça de fusão, e assim, determinar a morfologia do cordão de solda. A partir de determinadas concentrações de elementos ativos na poça de fusão, como o S, Se e O, o coeficiente angular da curva $d\gamma/dT$ é positivo.

Na literatura encontra-se que $d\gamma/dT$ é positivo para uma concentração de oxigênio no metal líquido maior que 40 ppm (KEENE, 1988). Uma vez que o fluxo de metal líquido se dá a partir da região de menor tensão superficial para a região de maior tensão superficial, o escoamento na poça de fusão será radialmente de fora para dentro na presença de elementos ativos em altas concentrações. Dessa maneira, somando-se esse efeito com as forças de Lorentz, o cordão de solda apresentará maior penetração, como mostrado esquematicamente na FIG. 2.19.a. Quando há uma carência dos elementos ativos, provocada pela reação com os elementos chamados reativos (Al, Si, Ca), o gradiente de tensão superficial será na direção contrária da força de Lorentz. Como a força de termocapilaridade (Convecção de Marangoni) tem uma maior influência do que a força de Lorentz, a solda resultante apresentará menor penetração, assim como pode ser observado na Fig. 2.19.b.

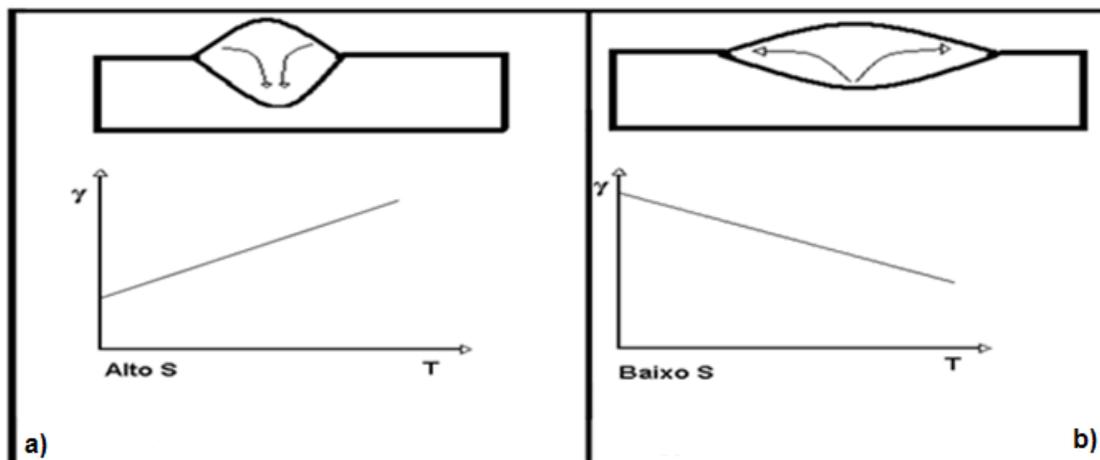


Figura 2.19 – Comportamento da tensão superficial em função da temperatura e movimento convectivo na poça de fusão devido ao Efeito Marangoni com a sua respectiva influência na morfologia do cordão de solda. a) maior concentração de elementos ativos e, b) menor concentração de elementos ativos (S, O, Se) (MILLS E KEENE, 1990).

MILLS E KEENE (1990) reportaram que o Al, Ca e Ce podem ter um efeito adverso na penetração por reduzir a quantidade de enxofre ou oxigênio dissolvido na poça de fusão. Da mesma forma, acredita-se que o carbono, por reagir facilmente com o oxigênio a altas temperaturas, reduza a disponibilidade de oxigênio livre no metal líquido, diminuindo o efeito desse elemento ativo nas forças de Marangoni, e, conseqüentemente, a penetração. Este trabalho tem como objetivo investigar a influência do teor de carbono do metal de base e alma do eletrodo revestido na morfologia do cordão

de soldas subaquáticas molhadas. Utilizaram-se dois diferentes teores de carbono no metal de base com o intuito de alterar a disponibilidade de átomos de carbono na poça de fusão e verificar se o mesmo atua como elemento reativo, alterando assim a convecção do metal líquido da poça de fusão e, conseqüentemente, a morfologia do cordão de solda. Também se espera observar se a variação no teor de carbono na alma do eletrodo altera o modelo proposto por TSAI E MASUBUCHI (1977), uma vez que os fenômenos propostos ocorrem em nível de transferência metálica.

CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1. Equipamentos e materiais utilizados

As soldas foram realizadas utilizando um sistema de soldagem por gravidade, FIG 3.1, dentro de um vaso hiperbárico, FIG. 3.2. O vaso, também chamado de câmara ou tanque hiperbárico, foi preenchido por água para simular o ambiente subaquático.

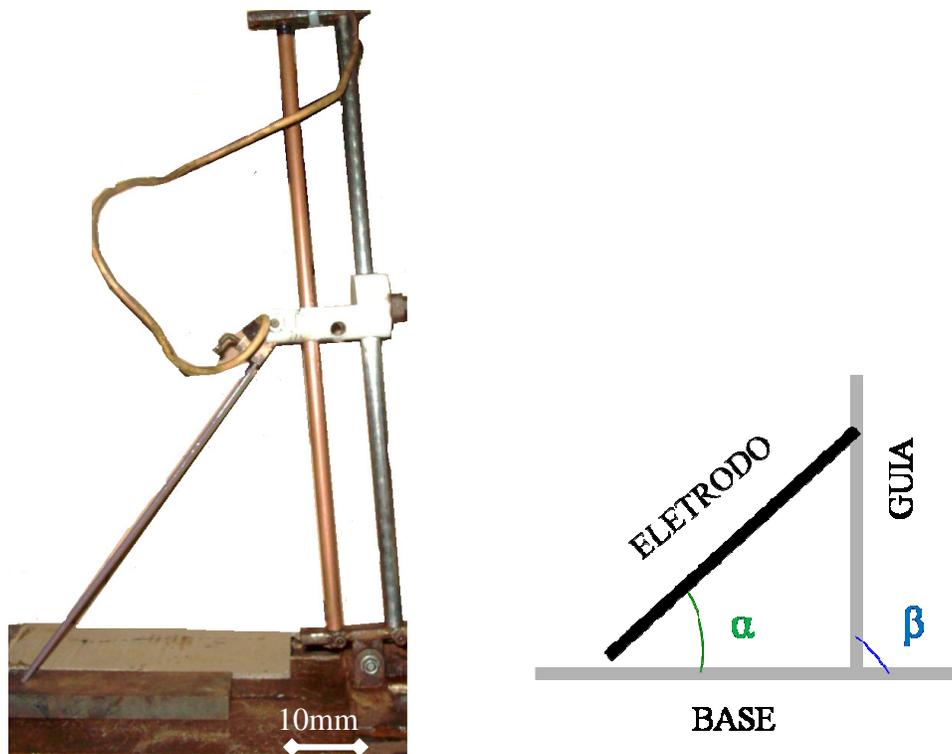


Figura 3.1. Fotografia do sistema de soldagem por gravidade e esquema representativo dos ângulos considerados.



Figura 3.2. Fotografia do vaso hiperbárico utilizado.

Utilizando o sistema de soldagem por gravidade é possível controlar os ângulos α e β . O ângulo α está ligado à velocidade, penetração e tensão de soldagem. Quanto maior α , menor será a velocidade e a tensão de soldagem, e maior será a penetração do cordão de solda. O ângulo β está ligado à força de tração que promove o movimento da garra de fixação do eletrodo pela guia de deslizamento, movimentação essa que se dá devido à força da gravidade. Uma vez mantidas as mesmas configurações para a soldagem, ângulos α e β e corrente de soldagem, esse sistema apresenta ótima repetibilidade. Para cada valor de α e β utilizado, existe um valor ótimo da corrente de soldagem que resultará em um comprimento de arco praticamente constante através do equilíbrio entre a velocidade de soldagem e o mergulho do eletrodo na poça de fusão. Uma limitação no uso desse mecanismo é o diâmetro do eletrodo, o qual, se muito pequeno, menor do que 3,25 milímetros, sofre flexão devido ao peso da garra de fixação do eletrodo, provocando alteração no ângulo α e, conseqüentemente na eficiência da proteção gasosa e a ruptura do revestimento do eletrodo.

O tanque hiperbárico, localizado no LRSS – Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulações, é capaz de simular profundidades de até 200 metros. Para utilização do tanque realiza-se o seguinte procedimento:

1. Posiciona-se o eletrodo e a chapa no mecanismo de soldagem por gravidade.
2. Posiciona-se o mecanismo utilizado para abertura do arco elétrico entre a ponta do eletrodo e a chapa.
3. Fecha-se a flange do tanque e apertam-se os parafusos.
4. Enche-se o tanque com água utilizando uma bomba hidráulica.
5. Após completamente cheia de água, pressuriza-se a câmara com ar comprimido até alcançar a pressão desejada, a qual pode ser visualizada através de um manômetro conectado ao tanque.
6. Selecionam-se os parâmetros de soldagem na máquina de solda.
7. Prepara-se o software para gravação dos sinais de tensão e corrente.
8. Conectam-se os cabos que fecham o circuito elétrico de soldagem e os cabos para realização da aquisição de dados.
9. Realiza-se a solda e aquisição dos dados.
10. Ao final da solda, desconectam-se os cabos e desliga-se a máquina de solda.
11. Despressuriza-se a câmara retirando o ar comprimido.
12. Esvazia-se o vaso, transportando a água para o reservatório utilizando a mesma bomba hidráulica.
13. Reposiciona-se o mecanismo de soldagem retirando-se a parte restante do eletrodo.
14. Remove-se a chapa com o cordão de solda para limpeza e observações.

Foi utilizada uma fonte de corrente constante com tensão de circuito aberto de 75 volts e faixa de corrente para eletrodos revestidos de 30 a 500 ampères.

Todos os cordões realizados foram monitorados utilizando-se um sistema de aquisição de dados constituído por uma placa de aquisição de 16 canais acoplada a um microcomputador, utilizando uma taxa de 1000 aquisições por segundo (1kHz). Nesse equipamento, a tensão é medida pela diferença de potencial entre os pólos positivo e negativo da máquina de solda e a corrente é medida pela utilização de um sensor Hall. A FIG. 3.3 apresenta o desenho esquemático do sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho.

Os sinais de corrente e tensão de soldagem foram gravados durante toda a soldagem. Para análise desses sinais, é importante considerar uma parte da soldagem em que o arco elétrico esteja fora da fase de transição que compreende o início e o fim do cordão de solda. Dessa maneira, tomaram-se os resultados compreendidos entre o décimo e o décimo quinto segundo de soldagem, com os quais se calcularam a média e o desvio padrão da tensão, além do número de curtos-circuitos ocorridos. Nesse trabalho, considera-se como curto-circuito cada momento em que a tensão de soldagem atinge valor inferior a 5,0 volts.

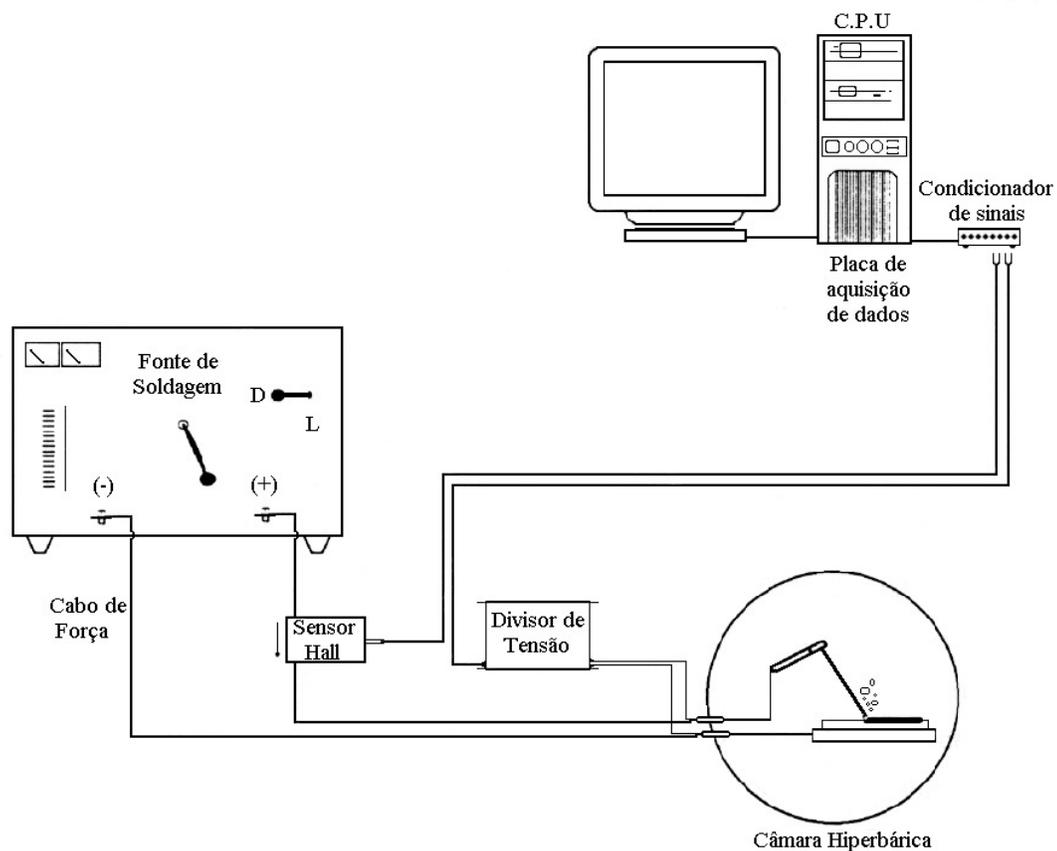


Figura 3.3. Esquema do sistema de aquisição de dados (PESSOA, 2003).

Eletrodos rutílicos E6013 de 4,0 milímetros de diâmetro da alma e comprimento de 350 milímetros foram utilizados. Para a fabricação dos eletrodos, dois tipos diferentes de arames para a alma foram utilizados. O primeiro com a composição química contendo baixíssimo teor de carbono, 0,002% e carbono equivalente (CE) de aproximadamente 0,01%, dificilmente encontrado no mercado

de materiais metálicos. Esse eletrodo será identificado ao longo do trabalho como “EN”. É reportado na literatura (PEREZ, 2007 e PESSOA, 2007) que eletrodos contendo baixíssimos teores de carbono na alma ou isentos desse elemento, produzem soldas molhadas com menor porosidade e com melhor qualidade da junta soldada e do cordão de solda. Os mesmos autores relacionaram as soldas realizadas com os eletrodos de baixo teor de carbono com baixo nível de curtos-circuitos e maiores valores de tensão do arco elétrico e, conseqüentemente, transferência metálica globular, o que explica a melhora na qualidade das soldas.

O segundo eletrodo, identificado como “EC”, contém aproximadamente 0,62% de carbono e de carbono equivalente, resultante do processo de cementação realizado nos arames do tipo EN. Espera-se que esse eletrodo resulte em soldas com maior teor de porosidade, uma vez que a maior disponibilidade de carbono presente no eletrodo resultará na maior reação desse elemento com o oxigênio, formando CO e CO₂, conforme descrito anteriormente.

Dessa maneira, a principal diferença entre os dois eletrodos utilizados está no teor de carbono da alma. A composição química das almas dos eletrodos está mostrada na TAB. 3.1. Todos os eletrodos foram fabricados e fornecidos pela ESAB e foram envernizados utilizando verniz comercial do tipo vinílico para evitar a decomposição do revestimento durante o contato com a água.

Tabela 3.1. Composição química da alma dos eletrodos utilizados.

Eletrodo	CE	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Cu	Ni
EN	0,02	0,002	0,05	não medido	0,018	0,001	não medido	0,01	0,02
EC	0,62	0,6	0,02	0,04	0,02	0,001	0,004	0,001	0,01

Para depósito dos cordões, dois diferentes tipos de materiais de base com dimensões de 4,8 x 150 x 250 milímetros foram utilizados. O primeiro, um aço típico 1010 com 0,1% de carbono e carbono equivalente de aproximadamente 0,24%, identificado como “N”. O segundo, resultante da cementação do aço N, e identificado como “C”, contendo aproximadamente 0,7% de carbono e de carbono equivalente. A TAB. 3.2 mostra a composição química dos materiais de base utilizados. As análises químicas do material da alma e do metal de base foram realizadas através de espectrometria por emissão óptica e análise intersticial gasosa (IGA).

Tabela 3.2. Composição química dos materiais de base utilizados.

Aço	CE	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Cu	Ni
N	0,24	0,11	0,77	0,06	0,01	0,01	0,004	0,01	< 0,011
C	0,70	0,66	0,22	0,06	0,01	< 0,005	0,004	0,03	< 0,011

A cementação é um processo termoquímico que consiste em se introduzir carbono na superfície do aço até uma profundidade em torno de 3,0mm, com o objetivo de se aumentar a dureza superficial do material, depois de convenientemente temperado. O carbono, que é difundido para a estrutura do material, se aloja nos contornos de grão na forma de cementita (Fe_3C).

Na cementação das peças utilizadas objetivou-se que a camada de cementação penetrasse totalmente nas peças. Sendo assim, uma vez que o arame dos eletrodos possui 4,0mm de diâmetro e a chapa do metal de base 4,8mm de espessura, considerou-se 2,0mm e 2,4mm como espessura da camada de cementação respectivamente.

Os materiais foram cementados em banho de sais, tais como cloretos e cianetos de bário, potássio e sódio, a uma temperatura entre 900 a 920° C durante aproximadamente 40 horas. As peças cementadas não passaram pela etapa de têmpera, pois o objetivo era apenas alterar o teor de carbono dos materiais sem alterar os outros elementos.

Como resultado da cementação, o aço C, ao contrário do que se esperava, apresentou redução no teor de manganês. Pode ter ocorrido um erro na medição da composição química desse metal, ocasionando essa divergência.

Dessa maneira, pôde-se analisar a variação da porosidade do metal de solda com a alteração do teor de carbono na alma dos eletrodos e no metal de base.

3.2. Procedimentos experimentais

Testes preliminares foram realizados para se definir a melhor corrente de soldagem mantendo-se os ângulos de soldagem em $\alpha = 60^\circ$ e $\beta = 110^\circ$. Conforme ANDRADE, et al (2008), essa configuração produz melhores resultados. A definição da melhor corrente para essa configuração foi baseada na análise da aparência superficial dos cordões, envolvendo regularidade na escamação do cordão e defeitos superficiais, tais como porosidade e mordedura. As correntes testadas foram de 160,

170, 190, 210 e 230 ampères, e a que resultou em um cordão com as melhores características foi o realizado utilizando a corrente de 210 ampères. Assim, os parâmetros de soldagem utilizados para a realização das soldas estão mostrados na TAB. 3.3. Todos os testes e as soldas foram realizados a uma profundidade equivalente de 50 metros, utilizando polaridade direta, DCEN.

Tabela 3.3. Parâmetros de soldagem utilizados para os testes.

Profundidade (m)	Ângulo α	Ângulo β	Corrente (A)
50	60	80	210

Três cordões de solda foram realizados para cada condição de soldagem (tipo de eletrodo e tipo de metal de base), totalizando doze cordões. Cada cordão de solda foi transversalmente seccionado em três pontos diferentes ao longo do comprimento, conforme mostrado na FIG. 3.4. Para garantir que os cortes transversais fossem feitos perpendicularmente à direção de soldagem, os cordões foram previamente separados individualmente. As amostras produzidas foram utilizadas para obtenção de imagens para o estudo da porosidade, estudo da morfologia do cordão, localização dos poros e macrografias. As amostras foram devidamente lixadas, polidas e atacadas utilizando solução de Nital a 2%.

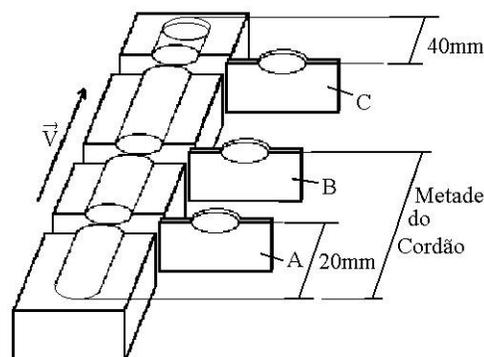


Figura 3.4 – Metodologia para retirada das amostras. (Pessoa, 2003)

Para a medição da porosidade, as amostras foram fotografadas em dois estágios. O primeiro, após o lixamento em lixas de granulação número 1200 e polimento em alumina de granulometria 1,0 micrometro, para a medição da área dos poros. O segundo estágio, após o ataque químico utilizando

solução de nital a 2%, para obtenção da área total do cordão de solda. A porosidade foi calculada então pela proporção entre a área dos poros e a área da seção transversal do cordão.

O estudo da morfologia do cordão foi realizado pela medição dos parâmetros da morfologia, tais como, largura, penetração e reforço, conforme mostrado na FIG. 3.5.

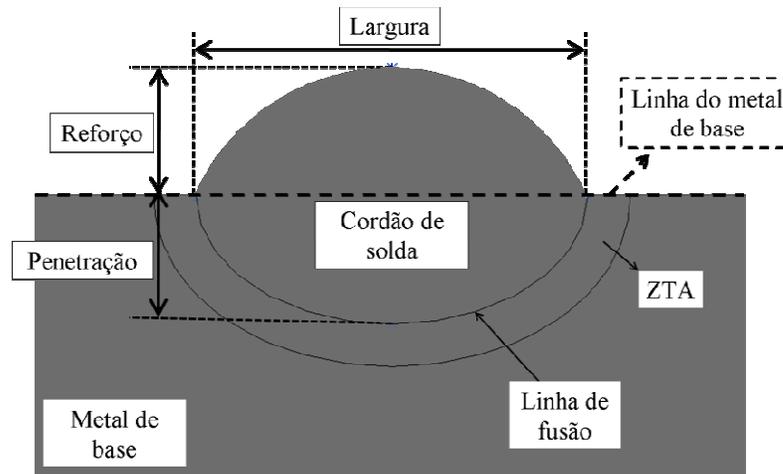


Figura 3.5. Parâmetros da morfologia do cordão de solda.

Para a medição dos parâmetros de morfologia, área dos poros e do cordão de solda foi utilizado um programa computacional devidamente calibrado para cada amostra chamado Qunicov. (PINTO, 1996) A calibração do programa é realizada tomando como base a escala da fotografia. Dessa maneira, foi necessário fotografar as amostras juntamente com uma escala para se definir a referência.

A FIG. 3.6 mostra o procedimento de retirada das amostras para realização de análise química do metal de solda. Para determinação do carbono, utilizou-se o método de combustão direta de detecção com infravermelho, e para determinação do Mn e do Si, a análise foi realizada através de espectrometria a plasma por emissão óptica.

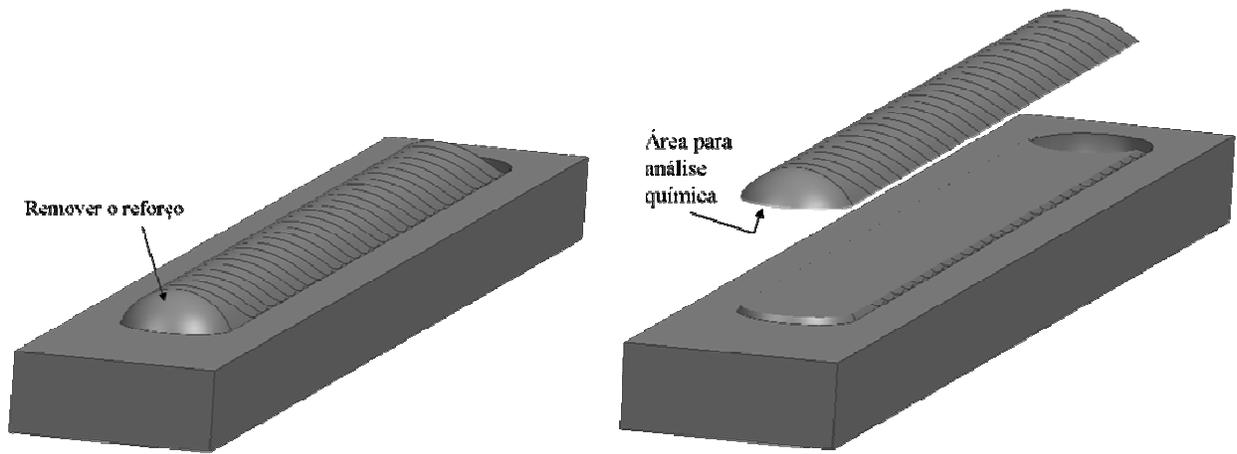


Figura 3.6. Procedimento de retirada de amostra para realização de análise química.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Inspeção visual

Os cordões de solda realizados estão mostrados nas FIG.'s 4.1 e 4.2. Como pode ser visto, os três cordões realizados para cada condição metal de base – eletrodo são semelhantes entre si, evidenciando uma considerável repetibilidade do processo, proporcionado pela utilização do dispositivo de soldagem por gravidade. Dessa maneira, os três cordões realizados em cada condição apresentaram características superficiais semelhantes, tais como molhabilidade, perfil do cordão e defeitos, como irregularidade e poros superficiais.

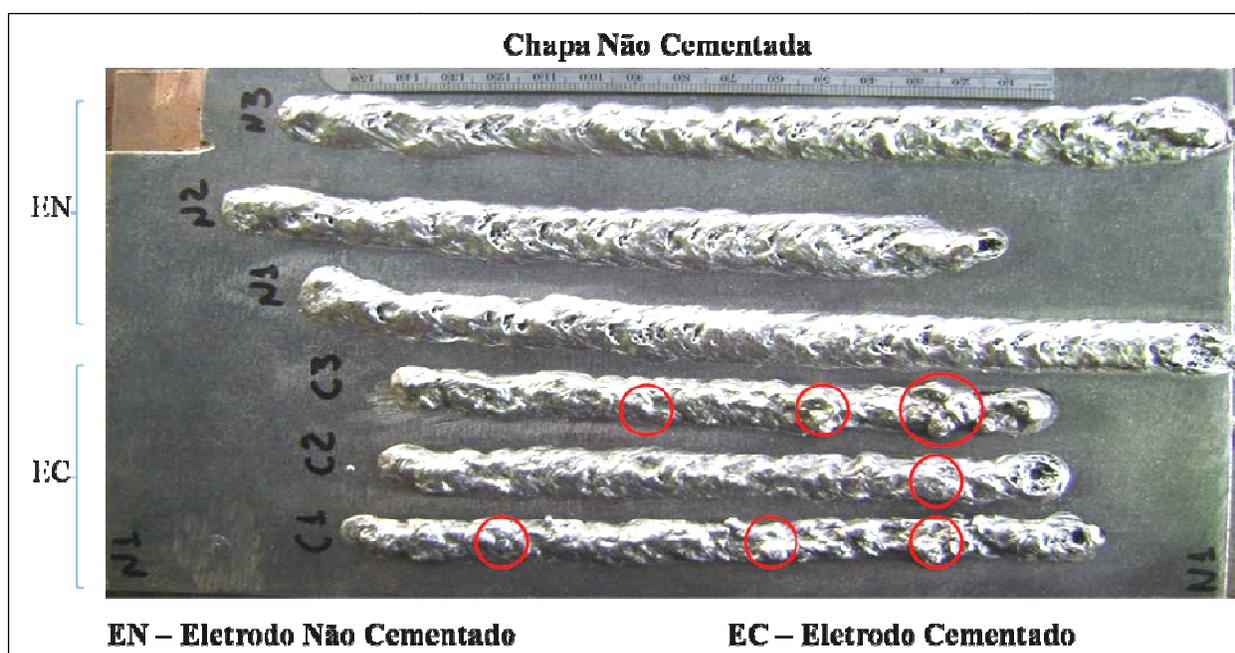


Figura 4.1. Cordões de solda realizados sobre o metal de base não cementado.

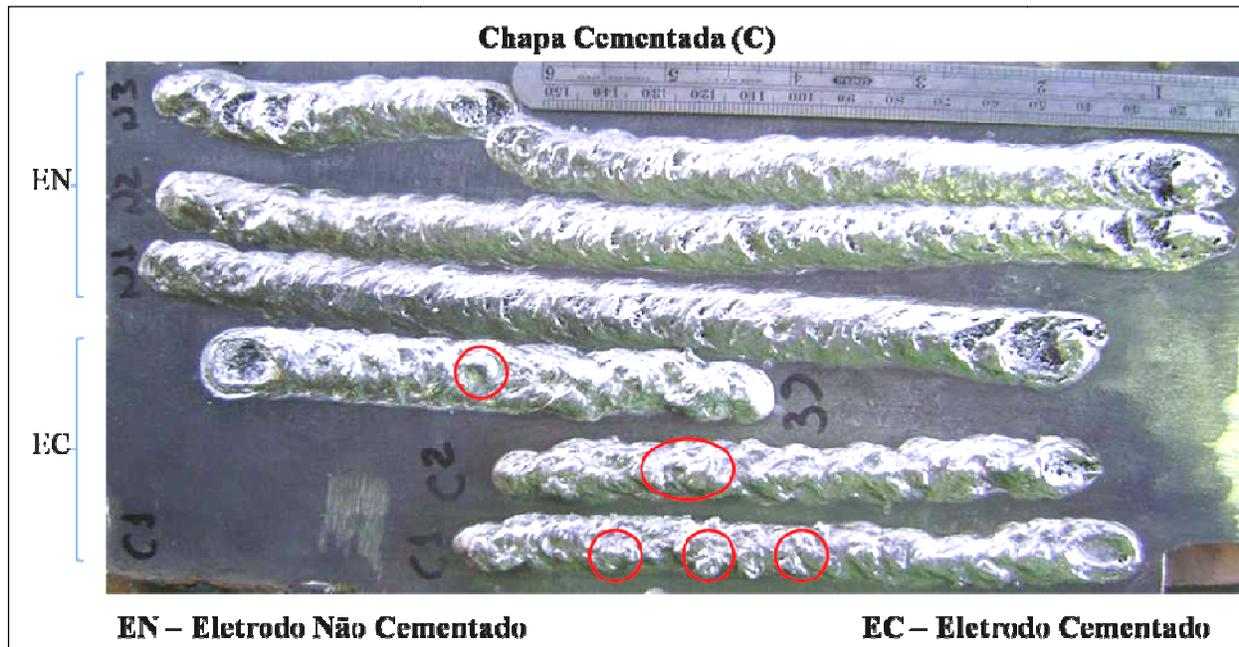


Figura 4.2. Cordões de solda realizados sobre o metal de base cementado.

Os cordões realizados com os eletrodos cementados apresentaram menor comprimento, porque foram utilizados eletrodos menores para realização das soldas.

Em geral, as soldas realizadas com os eletrodos não cementados (EN) apresentaram cordões com melhor molhabilidade, mais regulares superficialmente, com escamação mais coerente e com poros superficiais. Os cordões feitos com os eletrodos cementados (EC) apresentaram pouca molhabilidade, escamação irregular e ausência de poros superficiais. Porém esses cordões apresentaram irregularidades superficiais típicas de cordão de solda com porosidade interna, com algumas regiões mais pronunciadas do que outras ao longo de todo o comprimento do cordão, como realçado na FIG. 4.3. Isso pode ser um indício de que a porosidade das soldas realizadas com o eletrodo de maior teor de carbono (EC) seja maior do que a porosidade das soldas feitas com o eletrodo de menor teor de carbono (EN), conforme já relatado na literatura. (PESSOA, 2007) (PEREZ, 2007)

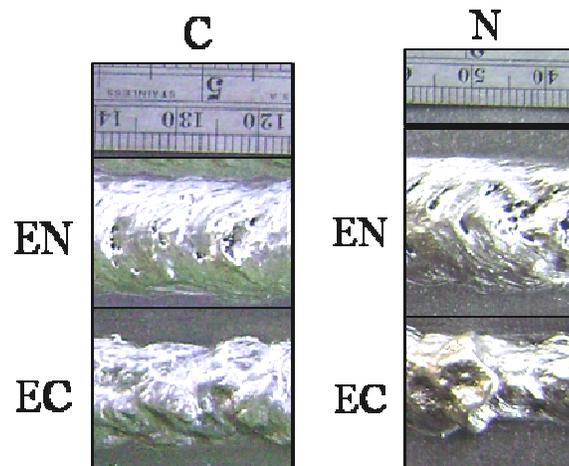


Figura 4.3. Detalhes da superfície dos cordões de solda realizados.

O fato de o cordão de solda não apresentar poros superficiais, pode ser um indicativo de que os poros não tiveram tempo suficiente para escapar completamente da região do metal de solda. Sendo assim, esses poros chegaram a tangenciar a superfície, sem escapar totalmente, deixando assim os vazios superficiais. Caso eles tivessem escapado completamente, o cordão assumiria um contorno superficial regular, com escamação coerente e sem poros superficiais.

Como mostrado na FIG. 4.3, os cordões de solda depositados sobre o metal de base cementado (C), utilizando tanto os eletrodos EN quanto os EC, apresentaram melhor aparência superficial, com cordões mais regulares e escamação mais fina. As soldas realizadas com os eletrodos EC sobre a chapa N apresentaram maior incidência de irregularidades pronunciadas do que na chapa C, o que pode indicar que a porosidade dos cordões depositados na chapa não cementada seja maior. Da mesma forma, os cordões realizados com o eletrodos EN sobre o metal de base N apresentaram maior irregularidade superficial e escamação menos coerente do que as soldas realizadas sobre a chapa C.

Dessa maneira, baseado na análise visual das soldas realizadas, a condição que provavelmente produzirá maior porosidade será a dos cordões depositados na chapa N utilizando o eletrodo EC, e a condição que resultará em menor porosidade será para as soldas depositadas no metal de base C utilizando o eletrodo EN.

4.2. Análise química do metal de solda

A FIG. 4.4 mostra os resultados da análise química do metal das soldas realizadas. Observa-se que o teor de carbono do metal de solda aumentou com o aumento do teor de carbono tanto na alma do eletrodo quanto no metal de base. O aumento do carbono na alma do eletrodo provocou aumento dos teores de manganês e silício para as soldas depositadas sobre o metal de base não cementado, porém apresentou um comportamento inverso para a chapa cementada. O aumento do teor de carbono no metal de base não provocou variação regular na concentração de manganês e silício do metal de solda. A partir destes resultados, pode-se inferir que o carbono da alma do eletrodo está sendo efetivo para preservar os elementos de liga importantes como o Mn e Si, enquanto o aumento do teor de carbono na chapa não influencia significativamente nesses elementos.

Conforme já previsto pelo diagrama de Ellingham, em temperaturas acima de 1400 °C e acima de 1750 °C, a reação de oxidação do carbono se trona preferencial à oxidação do manganês e do silício respectivamente. Uma vez que as temperaturas do arco elétrico superam os 2000 °C, o carbono possui preferência de oxidação comparada a esses outros elementos.

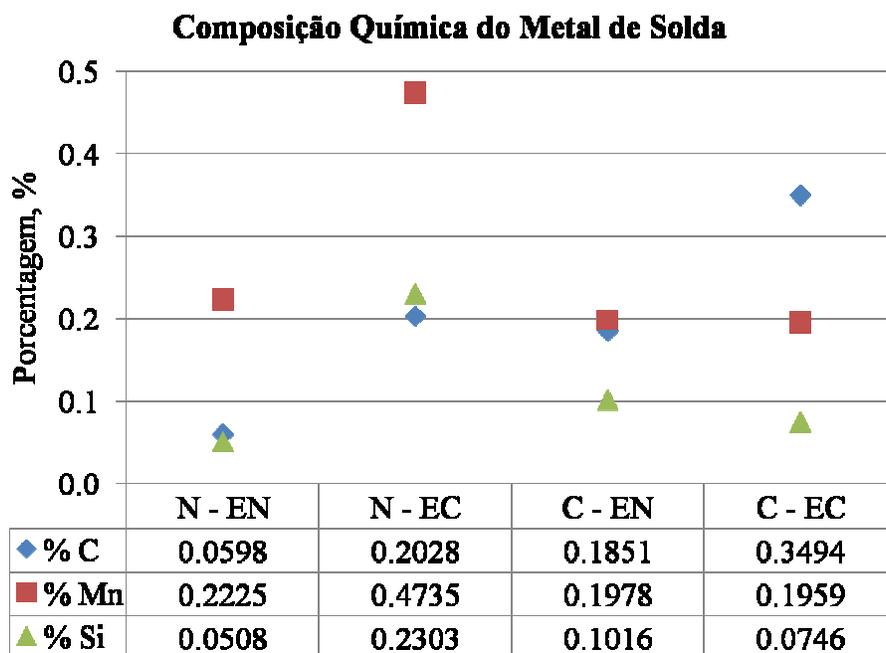


Figura 4.4. Composição química do metal de solda.

Por meio do software Quantikov, calculou-se a área do metal de base fundido (área do cordão de solda abaixo da altura do metal de base) e área total do metal de solda com o objetivo de tornarem-se conhecidos os valores de diluição, EQ. 4.1, para cada combinação eletrodo-metal de base, mostrados na TAB. 4.1. Com estes valores, calculou-se qual seria a concentração teórica de carbono do metal de solda, EQ. 4.2, considerando que não houvesse formação de poros ou perda desse elemento através do arco elétrico, TAB. 4.2. O mesmo procedimento de cálculo foi feito para análise do manganês e do silício, cujos resultados estão mostrados na TAB. 4.3 e TAB 4.4, respectivamente.

$$D = \frac{A_{MB}}{A_{MB} + A_{MA}} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Onde:

D = Diluição;

A_{MB} = Área do cordão de solda abaixo da linha do metal de base;

A_{MA} = Área do cordão de solda acima da linha do metal de base;

$$C_{MS} = \frac{C_{MA} \cdot (100 - D) + C_{MB} \cdot (D)}{100} \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde:

C_{MS} = Carbono teórico no metal de solda;

C_{MA} = Teor de carbono do metal de adição;

C_{MB} = Teor de carbono do metal de base;

Tabela 4.1. Diluição dos cordões de solda.

Diluição (%)			
N-EN	N-EC	C-EN	C-EC
56,6	59,5	57,3	55,6

Tabela 4.2. Diferença entre o teor de carbono esperado e o que realmente foi transferido para o metal de solda.

Diferença (%) (C teórico – C medido)			
N-EN	N-EC	C-EN	C-EC
0,0036	0,2197	0,1941	0,3510

Tabela 4.3. Diferença entre o teor de manganês esperado e o que realmente foi transferido para o metal de solda.

Diferença (%) (Mn teórico – Mn medido)			
N-EN	N-EC	C-EN	C-EC
0,4144	0,2673	-0,0304	-0,2160

Tabela 4.4. Diferença entre o teor de silício esperado e o que realmente foi transferido para o metal de solda.

Diferença (%) (Si teórico – Si medido)			
N-EN	N-EC	C-EN	C-EC
-0,0032	-0,1433	-0,1278	-0,2938

O gráfico da FIG. 4.5 sumariza os dados das TAB's 4.2, 4.3 e 4.4.

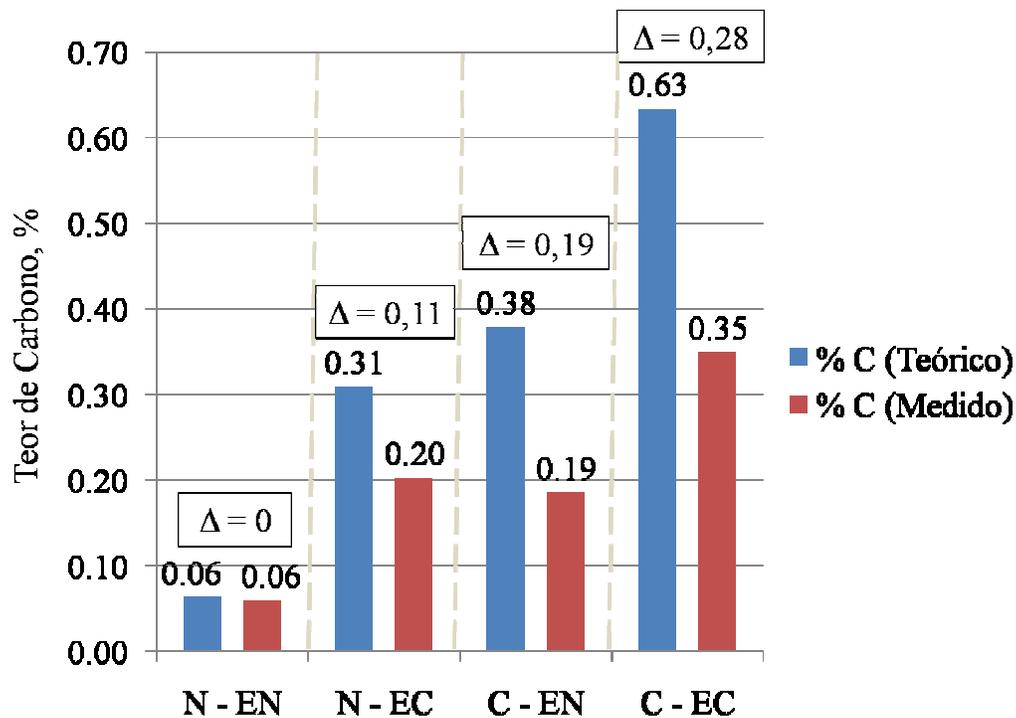


Figura 4.5. Diferença entre as concentrações dos elementos teóricos e medidos do metal de solda.

Como pode ser visto na FIG 4.5, o aumento do teor de carbono da alma do eletrodo e do metal de base resultou no aumento da diferença entre o carbono esperado no metal de solda e o que realmente foi medido por meio de análise química. Provavelmente, esta diferença no teor de carbono pode ser responsável pela formação de poros do metal de solda. Sendo assim, quanto maior a diferença, maior será a porosidade do metal de solda.

4.3. Geometria do cordão de solda e análise dos sinais de tensão

O resultado da análise da geometria do cordão de solda, penetração, reforço e largura estão mostrados nas FIG.'s 4.6, 4.7 e 4.8, respectivamente. Para cada cordão de solda foram feitas três cortes transversais, sendo assim, uma vez que foram feitos três cordões de solda para cada condição eletrodo-metal de base, nove amostras foram retiradas para cada condição. Cada amostra foi medida três vezes, o que resulta num total de vinte e sete medições para cada condição eletrodo-metal de base. Portanto

resultado está apresentado como a média e o desvio padrão em relação à média das vinte e sete medições realizadas para cada condição eletrodo-metal de base.

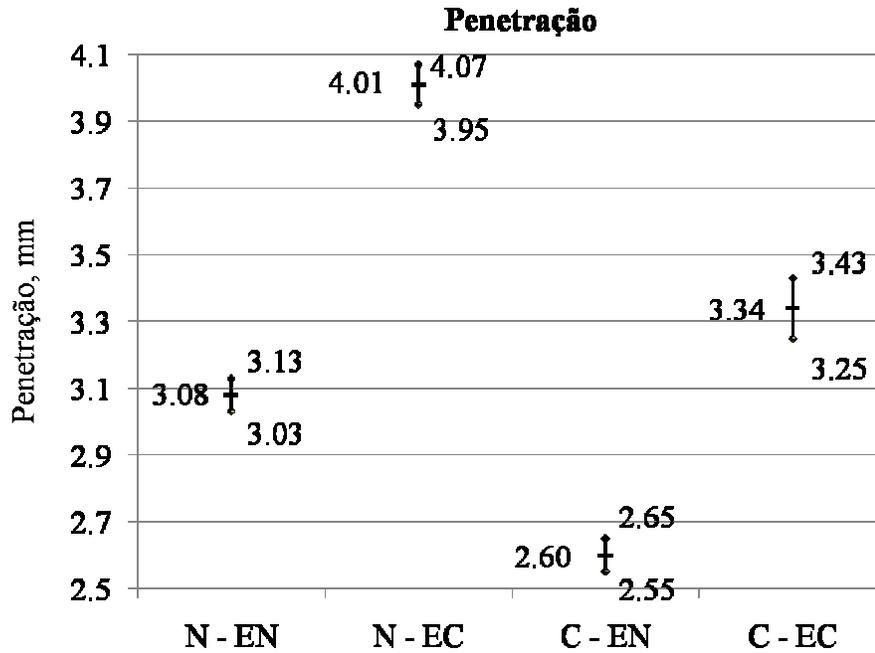


Figura 4.6. Penetração dos cordões de solda.

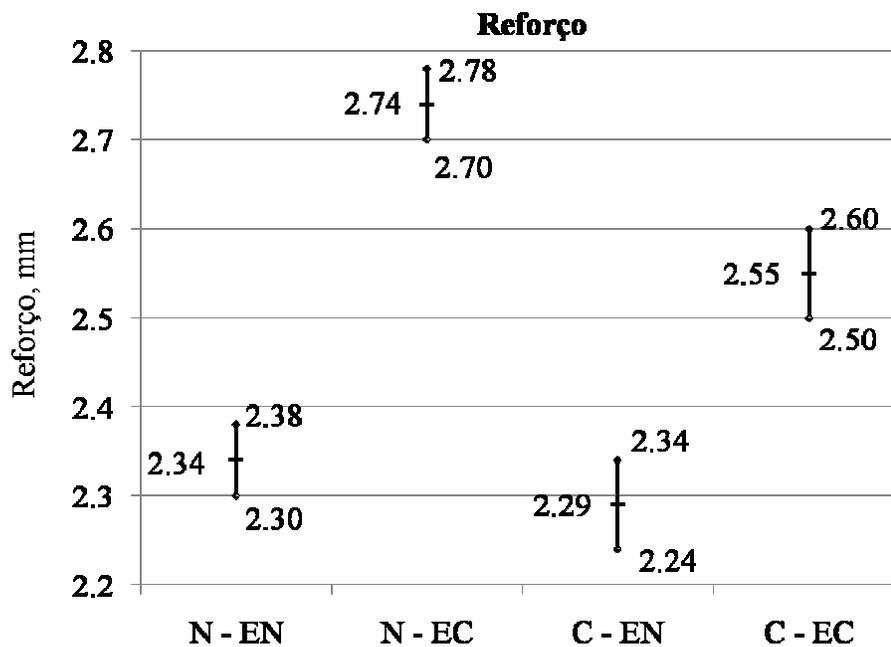


Figura 4.7. Reforço dos cordões de solda.

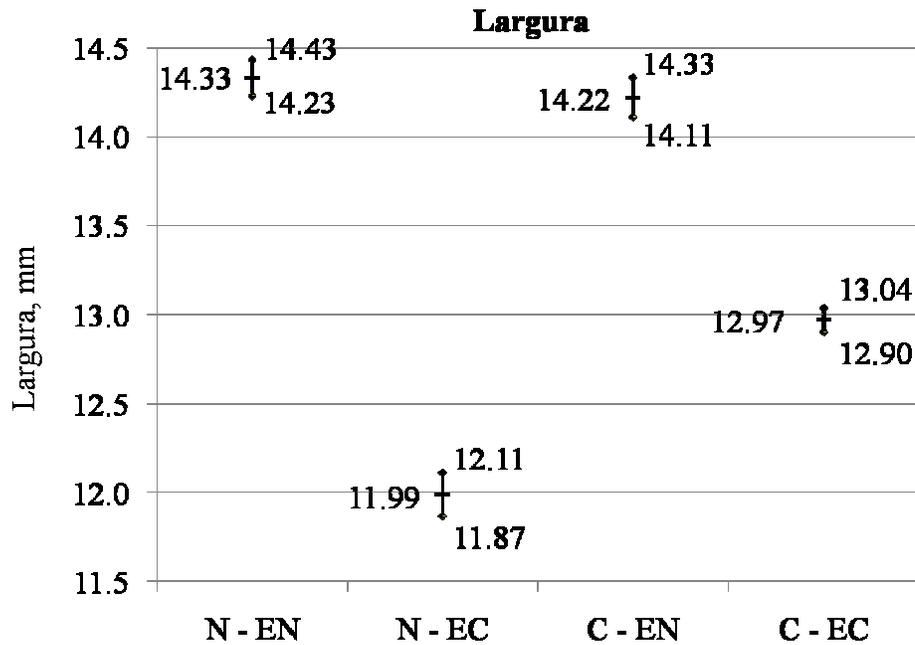


Figura 4.8. Largura dos cordões de solda.

As soldas realizadas com os eletrodos cementados apresentaram maior penetração, maior reforço e menor largura em relação às soldas realizadas com os eletrodos não cementados. Considerando as soldas feitas com um mesmo eletrodo e em diferentes metais de base, as soldas feitas sobre a chapa não cementada apresentaram maior penetração e maior reforço do que sobre a chapa cementada.

O cordão de solda com maior penetração e reforço pode resultar em maior porosidade presente no metal solidificado, uma vez que o caminho que as bolhas de gases contidas na poça de fusão devem percorrer para escapar do metal fundido é maior do que para um cordão de solda com menores valores de reforço e penetração. Sendo assim, é provável que a porosidade das soldas realizadas com os eletrodos EC e sobre o metal de base não cementado, situação que apresentou maior diluição e grande diferença entre os teores de carbono teórico e medido (mesmo não sendo a maior diferença encontrada), seja a maior dentre todas as condições. E que a porosidade das soldas realizadas com os eletrodos EN e metal de base cementado seja a menor, mesmo apesar de a diluição e a diferença entre os teores de carbono teórico e medido nesse caso não ter sido a menor.

Os gráficos da relação D/W (penetração/largura) dos cordões de solda estão mostrados na FIG. 4.9. Como se pode observar, a razão D/W diminuiu com o aumento do teor de carbono na chapa, tanto para o eletrodo EN quanto para o eletrodo EC. Com o eletrodo de baixo carbono na alma, a razão D/W diminuiu em torno de 18% quando se aumentou o teor de carbono no metal base. O mesmo comportamento se observou para o eletrodo de alto carbono na alma, sendo observado um decréscimo de 21%.

Heiple e Roper (1982) estudaram o efeito da adição de S, Al e O na morfologia dos cordões de soldas produzidos pelo processo GTAW. Os autores verificaram que mudanças substanciais foram produzidas no formato da zona de fusão pela adição de pequenas quantidades de certos elementos na poça de fusão, incluindo S e Al, e possivelmente, o oxigênio. A adição de 50ppm de enxofre aumentou a razão penetração/largura de soldas GTAW em aço inoxidável em torno de 80%. E a adição de Al na mesma magnitude produziu significativas reduções na razão penetração/largura. Assim como o Al atua como um reagente ativo, o C pode apresentar o mesmo efeito na soldagem subaquática molhada. Um maior teor de carbono do metal base acarreta em maior número de reações deste elemento com o oxigênio, formando o monóxido de carbono e/ou dióxido de carbono. Desta forma, provavelmente na condição com a chapa cementada, o número de átomos de oxigênio livres na poça de fusão pode não ter sido suficiente para impulsionar o fluxo convectivo da poça de fusão de fora para dentro, o que resultou em soldas com uma menor razão D/W, como pode ser observado na FIG. 4.9.

Sabendo-se que a taxa de resfriamento das soldas subaquáticas é muito alta, pode-se pensar que o fluxo convectivo da poça de fusão não interfira na morfologia do cordão de solda da mesma forma do que nas soldas realizadas ao ar. Porém, uma vez que a corrente de soldagem para todas as condições eletrodo/metal de base foi a mesma (200 A), a modificação na relação D/W pode ter sido influenciada pela diferença do teor de carbono disponível no metal de solda, a qual foi propositalmente muito elevada.

Deve-se ressaltar que, apesar de o carbono poder atuar de forma indireta no efeito Marangoni, não é usual aumentar o teor de carbono do consumível ou do metal base, devido a problemas relatados na literatura (LIU *et al*, 1994b), como por exemplo, a formação de martensita na zona afetada pelo calor e maior propensão ao trincamento a frio das juntas soldadas.

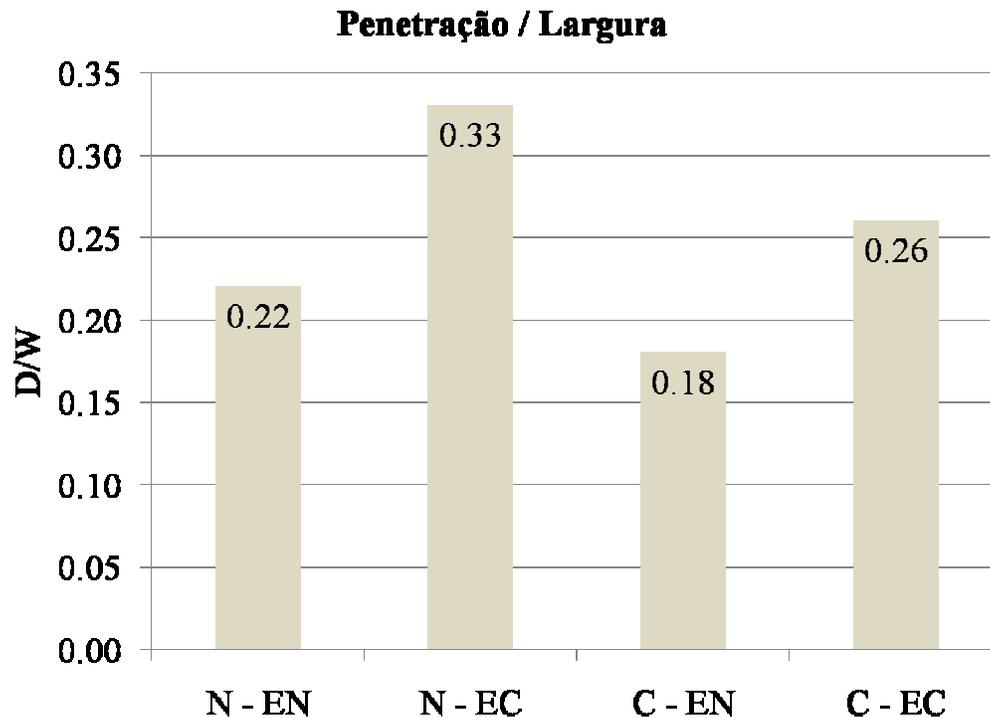


Figura 4.9 - Razão penetração/largura (D/W).

Em relação à variação do teor de carbono na alma do eletrodo, verificou-se que a relação D/W aumentou com o devido aumento do teor de carbono na alma do eletrodo. Utilizando-se a chapa N, verificou-se um aumento de 50% na relação D/W. Com a chapa C, verificou-se um aumento de 44% na relação D/W. Estes resultados podem ser visualizados na FIG. 4.9.

O aumento do teor de carbono na alma do eletrodo produziu um efeito similar ao que ocorre com a mudança de polaridade de DCEP para DCEN, conforme proposto por TSAI E MASUBUCHI (1977). A análise de sinais de tensão revelou que a média da tensão diminuiu e o número de curtos-circuitos (NCC) aumentou com o aumento do teor de carbono na alma do eletrodo, como pode ser visualizado na FIG. 4.10. Uma menor tensão de soldagem, possivelmente provocada pela redução no tamanho do cone do eletrodo, resultou na diminuição da largura da base do arco elétrico. Conseqüentemente, ocorre uma maior concentração da energia do arco, acarretando em um aumento de penetração e reforço, e diminuição da largura do cordão de solda, como relatado por PESSOA *et al* (2004), o qual comprovou o mesmo efeito na mudança de polaridade de DCEP para DCEN. O aumento no número de curtos-circuitos é mais um indicativo que ocorreu uma redução no comprimento do arco elétrico.

Considerando aspectos relacionados à transferência metálica, um cone maior é mais vantajoso por ocasionar maior tensão de soldagem e transferência metálica globular, ao invés de transferência por curto-circuito. Por outro lado, considerando que os poros são formados ainda na ponta do eletrodo, um cone maior aumentará o tempo que a gota metálica leva para atingir a poça de fusão e, conseqüentemente mais reações do carbono com o oxigênio do ambiente acontecerá, aumentando a porosidade do metal de solda. Portanto, é provável que exista um tamanho ideal do cone da ponta do eletrodo que irá equilibrar esses dois aspectos minimizando a porosidade.

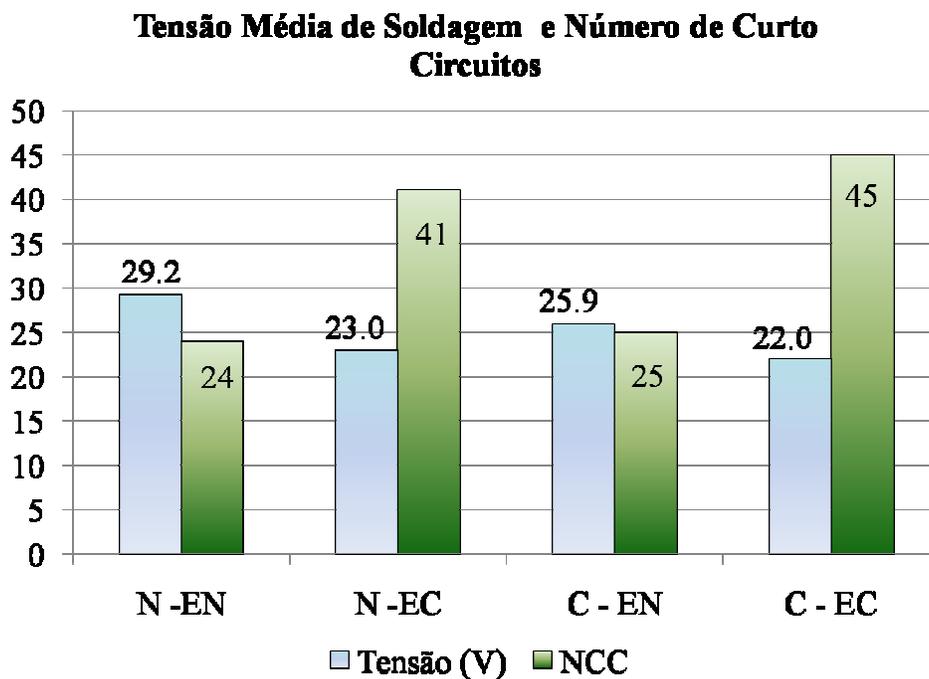


Figura 4.10. Tensão de soldagem e número de curtos-circuitos.

No capítulo Anexo A, estão mostrados os oscilogramas de tensão dentro do intervalo entre o décimo e o décimo quinto segundo de cada cordão para todas as condições eletrodo-metal de base testadas. Como pode ser visto pelos oscilogramas, a transferência metálica predominante é por curto-circuito, caracterizada pelo baixo valor da tensão do arco elétrico e freqüente queda desse valor a valores muito baixos, menores do que 5,0 volts e além de gotas maiores do que a ponta do eletrodo.

Em soldagem subaquática, a transferência metálica por curto-circuito está diretamente ligada à porosidade no metal de solda (PESSOA, 2008 e PEREZ, 2007). Menor tensão de soldagem e maior número de curtos-circuitos implicam que a gota metálica fica por mais tempo desprotegida, pois no

momento que ocorre um curto-circuito, a proteção gasosa é momentaneamente interrompida e desta forma, gases contaminantes têm uma maior facilidade de serem transferidos para a gota metálica. Sendo assim, a solda que apresentar menor tensão do arco e maior quantidade de curtos-circuitos terá maior probabilidade de apresentar porosidade no metal de solda.

A FIG. 4.11 mostra os valores da média e do desvio da tensão de soldagem. O desvio da tensão está diretamente ligado à estabilidade do arco elétrico, sendo que quanto maior for o desvio, menos estável será o arco, e vice-versa. Por sua vez, a estabilidade do arco durante a soldagem está diretamente ligada à qualidade do cordão de solda e à quantidade de poros resultante. Pelos valores apresentados na FIG. 4.11, e tomando-se a razão do valor do desvio sobre a média da tensão para cada condição eletrodo-metal de base, percebe-se que os maiores valores dessa razão, 39,54% e 38,3%, correspondem às condições descritas anteriormente onde se espera obter maior porosidade, que são nas soldas realizadas com o eletrodo EC depositadas sobre os metais de base cementado e não cementado, respectivamente. Por outro lado, os menores valores da razão, 34,13% e 31,66%, correspondem às condições onde se espera obter menor porosidade, que são nas soldas realizadas com o eletrodo EN depositadas sobre os metais de base não cementado e cementado, respectivamente.

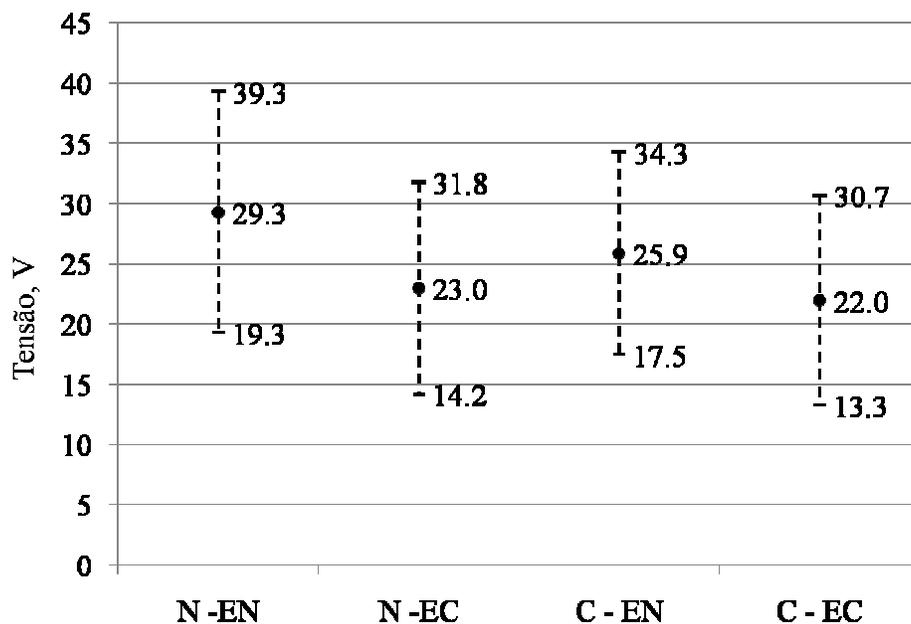


Figura 4.11. Valores de tensão de soldagem.

A FIG. 4.12 mostra a quantidade de curtos-circuitos ocorridos dentro do intervalo entre o décimo e o décimo quinto segundo de soldagem. Considerou-se como curto-circuito cada momento em que a tensão atinge valores inferiores a 5,0 volts. Mais uma vez, considerando como resultado a tensão média de soldagem e o número de curtos-circuitos espera-se que as soldas realizadas com o eletrodo cementado depositadas sobre os dois metais de base apresentem maior porosidade, pois foram as condições que apresentaram menor tensão de arco e maior número de curtos-circuitos.

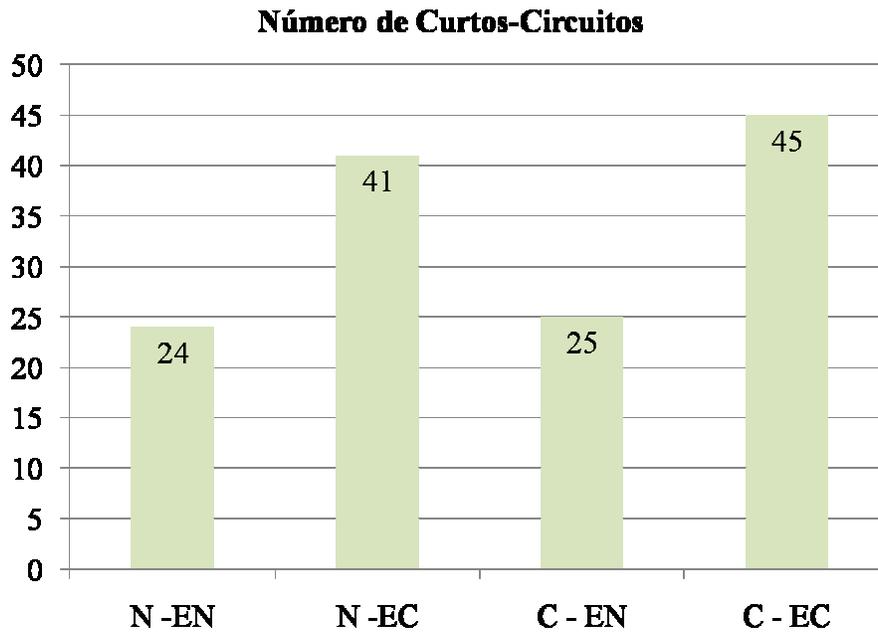


Figura 4.12. Número de curtos-circuitos.

Pelas FIG.'s 4.11 e 4.12, espera-se que nas condições onde a tensão de soldagem for menor e o número de curtos-circuitos for maior obtenha-se maior porosidade. Esses resultados, somados aos outros expostos anteriormente reforçam a teoria proposta por PESSOA (2007) e PEREZ (2007), a qual diz que a porosidade do metal de solda está diretamente ligada à transferência metálica por curto-circuito.

4.4. Porosidade no metal de solda

As FIG.'s 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 mostram macrografias dos corpos de prova retirados do início (A), meio (B) e fim (C) dos três cordões de solda realizados com as combinações N – EN, N – EC, C – EN e C – EC, utilizadas para a quantificação da porosidade do metal de solda. Os resultados com a média da porosidade e os valores máximos e mínimos para cada condição eletrodo-metal de base estão mostrados na FIG. 4.17.

Como pode ser visto nas FIG.'s 4.13 a 4.16 e pelo alto desvio na média dos valores apresentados na FIG. 4.17, e assim como relatado na literatura, (PESSOA, 2007), a porosidade varia consideravelmente ao longo do comprimento do cordão de solda, e essa alteração está ligada à mudança na composição química do metal de solda. (BRACARENSE, 1994)

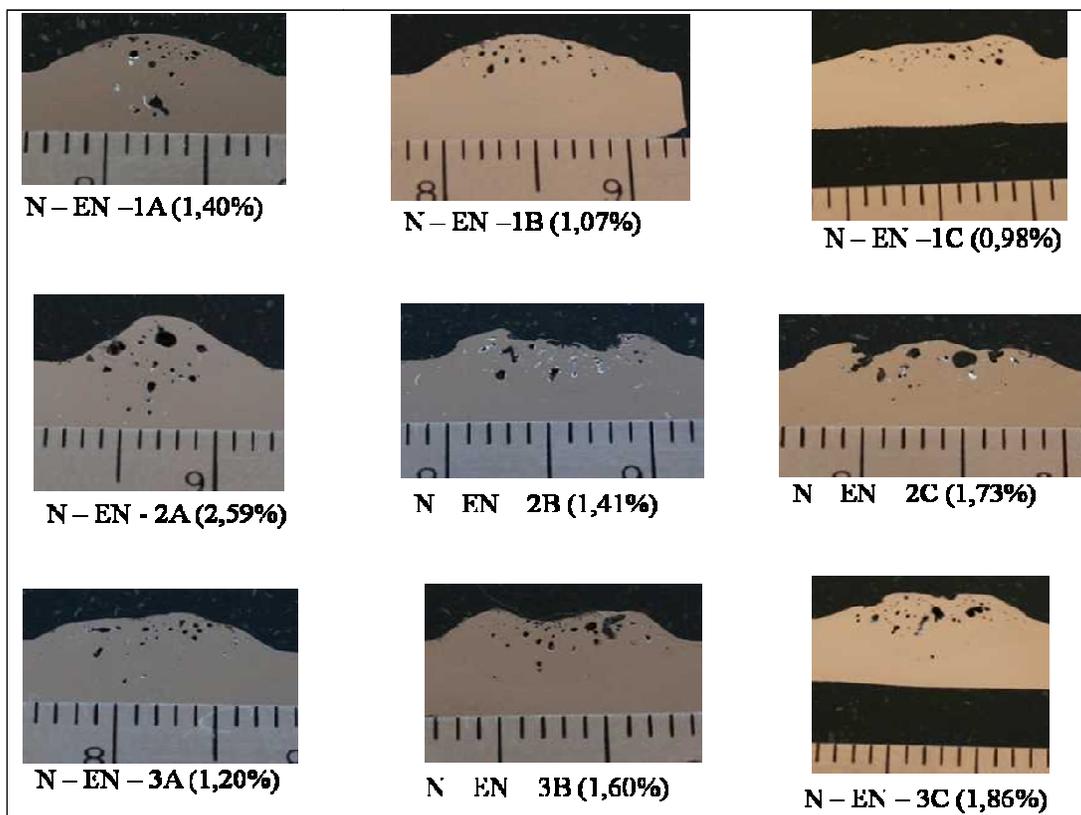


Figura 4.13. Macrografia de três cordões de solda realizados com as combinações chapa não cementada (N) e eletrodo não cementado (EN).

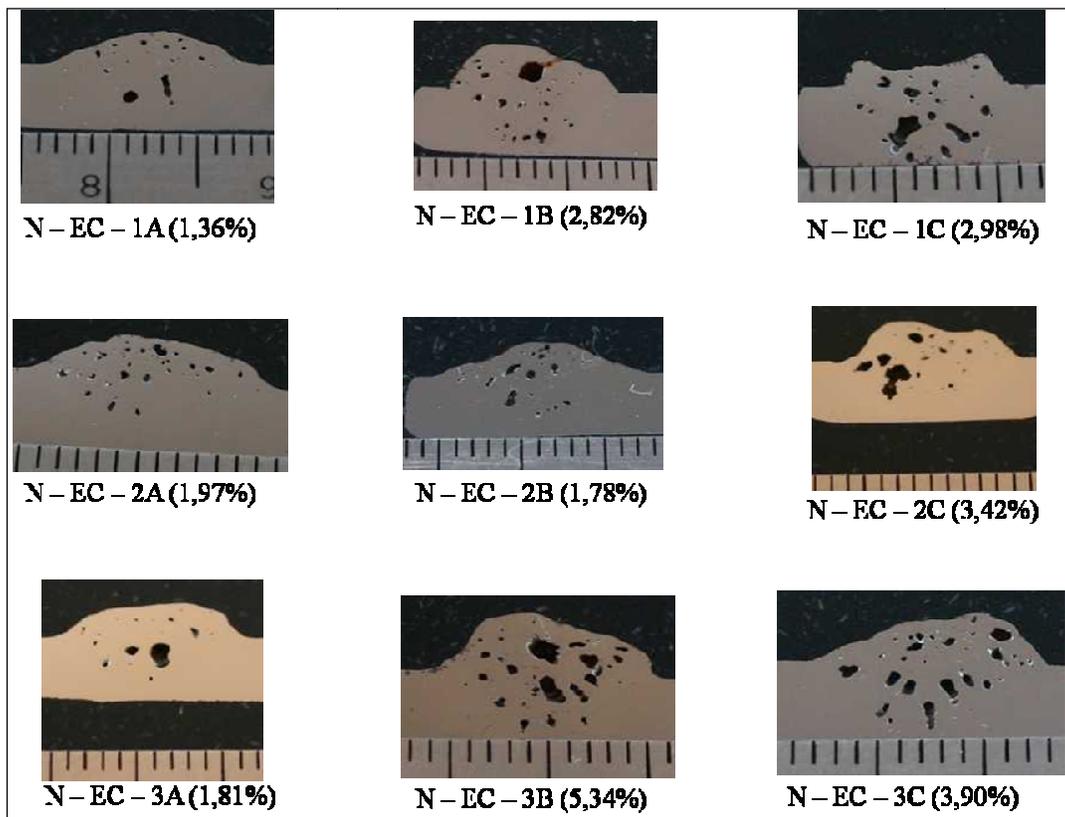


Figura 4.14. Macrografia de três cordões de solda realizados com as combinações chapa não cementada (N) e eletrodo cementado (EC).

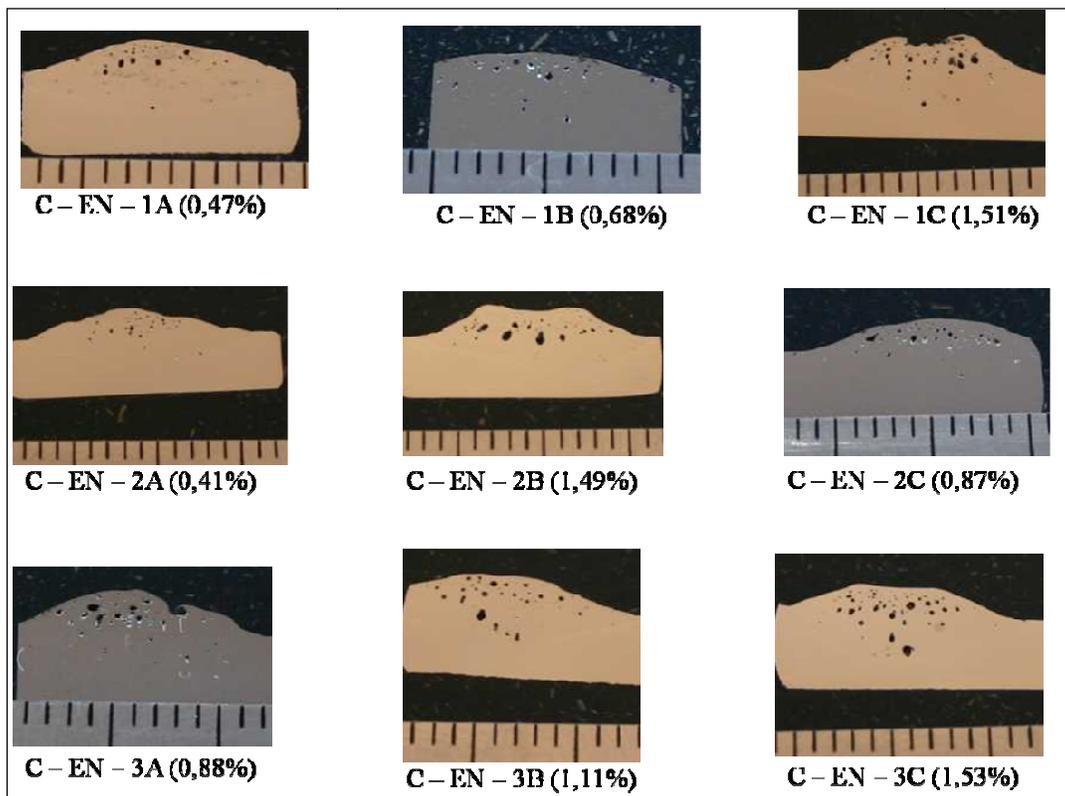


Figura 4.15. Macrografia de três cordões de solda realizados com as combinações chapa cementada (C) e eletrodo não cementado (EN).

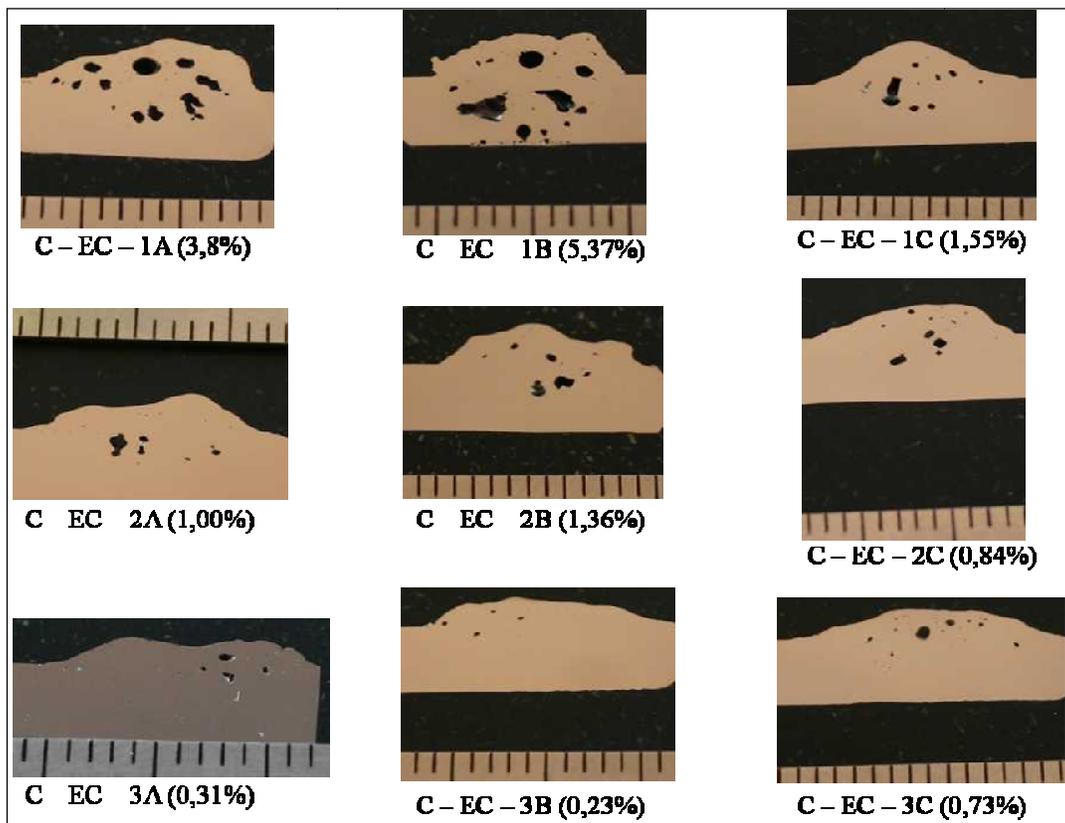


Figura 4.16. Macrografia de três cordões de solda realizados com as combinações chapa cementada (C) e eletrodo cementado (EC).

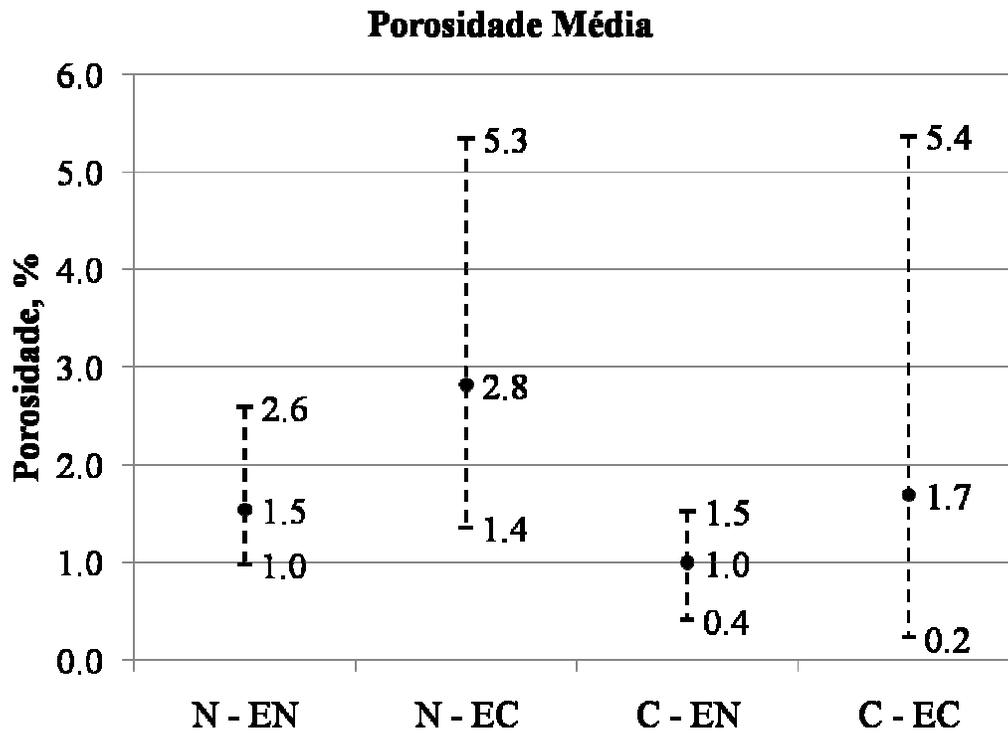


Figura 4.17. Porosidade no metal de solda.

Como já era previsto pelos resultados até aqui apresentados, inspeção visual, geometria do cordão de solda e análise dos sinais de tensão, a condição que resultou em maior porosidade foram as soldas realizadas sobre o metal de base não cementado utilizando eletrodos com alma cementada, N - EC, atingindo uma porosidade média de 2,8%. E a condição de menor porosidade foram as soldas realizadas sobre o metal de base cementado utilizando eletrodos com alma não cementada, C - EN, alcançando uma porosidade média de 1,0%.

Para as soldas depositadas sobre o mesmo metal base, o uso de eletrodos com alma cementada resultou em maior porosidade nos dois casos, chapa cementada e chapa não cementada. Isto significa que o carbono está sendo efetivo para a formação de gases no interior da gota líquida, que posteriormente é transferida para a poça de fusão, acarretando na formação de bolhas de gases e, conseqüentemente, de poros após a solidificação do metal de solda, conforme descrito na literatura (PESSOA, 2007).

Para as soldas depositadas utilizando o mesmo eletrodo, as soldas depositadas sobre o metal de base cementado resultaram em menor porosidade. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que,

utilizando o metal de base com maior teor de carbono, os cordões de solda apresentaram maiores valores de penetração e reforço, por motivos já discutidos anteriormente, dificultando o escape das bolhas, aumentando a porosidade. Além disso, nessas condições, as soldas apresentaram menores valores de tensão de soldagem.

A porosidade das soldas realizadas com o eletrodo não cementado sobre a chapa cementada foi a menor dentre as condições eletrodo/metal de base testadas. Uma vez que o teor de carbono do eletrodo nesse caso é muito pequeno, pode-se dizer que nesse caso o hidrogênio desempenhou uma contribuição relativamente maior do que nas soldas realizadas com eletrodo cementado.

A TAB. 4.5 mostra um resumo do efeito que o aumento do teor de carbono na alma do eletrodo e no metal de base tem sobre as propriedades avaliadas ao longo desse capítulo.

Tabela 4.5. Tabela resumo de causa e efeito.

CAUSA \ EFEITO	ANÁLISE VISUAL	POROSIDADE	NCC	TENSÃO MÉDIA	PENETRAÇÃO	REFORÇO	LARGURA	D/W
AUMENTO DO TEOR DE CARBONO NA ALMA DO ELETRODO	PIOR QUALIDADE	MAIOR	MAIOR	MENOR	MAIOR	MAIOR	MENOR	MAIOR
AUMENTO DO TEOR DE CARBONO NO METAL DE BASE	MELHOR QUALIDADE	MENOR	IGUAL	IGUAL	MENOR	MENOR	Não Conclusivo	MENOR

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

O estudo do efeito do teor de carbono do metal de adição e do metal de base sobre a porosidade do metal de solda resultou nas seguintes conclusões:

1. O teor de carbono contido na alma do eletrodo revestido influenciou diretamente na porosidade do metal de solda. Quanto maior a concentração desse elemento na alma do eletrodo, maior foi a porosidade.
2. A concentração de carbono contido no metal de base influenciou inversamente na porosidade do metal de solda. Quanto maior a concentração desse elemento no metal de base, menor foi a porosidade.
3. O aumento do teor de carbono no sistema, tanto devido a alma do eletrodo quanto devido ao metal de base, aumentou a perda do carbono através do arco elétrico e a redução do teor de carbono no metal de solda.
4. A morfologia do cordão de solda foi fortemente influenciada pela quantidade de carbono contido no metal fundido (metal de adição e metal de base). O carbono, devido à sua reação com o oxigênio, pode ter desempenhado um importante papel como elemento reativo em relação aos movimentos de convecção de Marangoni na poça de fusão, porém essa afirmação deve ser estudada com mais detalhes. Sendo assim,
 - a. O aumento do teor de carbono no metal de adição implicou em maior relação penetração/largura do cordão de solda, e vice-versa.
 - b. O aumento da concentração de carbono no metal de base provocou diminuição na relação penetração/largura do cordão de solda, e vice-versa.
5. O teor de carbono no sistema influenciou a estabilidade do arco elétrico.
 - a. O aumento da concentração de carbono na alma do eletrodo acarretou em menor tensão de soldagem, maior desvio da tensão e maior número de curtos-circuitos durante a soldagem.
 - b. O aumento do teor de carbono no metal de base provocou diminuição da tensão de soldagem, porém o número de curtos-circuitos não alterou significativamente.
6. A aparência do cordão de solda foi fortemente alterada pelo teor de carbono do metal fundido.

- a. Quanto maior a concentração de carbono no metal de adição, pior foi a qualidade visual da superfície do cordão de solda.
 - b. Quanto maior o teor de carbono no metal de base, melhor aparência superficial teve o cordão de solda.
7. O carbono contido na alma do eletrodo mostrou-se eficiente na proteção dos elementos de liga como o manganês e o silício. Por outro lado, e por razões desconhecidas, o carbono do metal de base não influenciou de forma significativa na concentração desses elementos no metal de solda.

CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar mais detalhadamente o efeito do carbono sobre as forças convectivas de Marangoni no metal das soldas subaquáticas.
- Avaliar o efeito do aumento do teor de carbono do metal de adição na posição vertical de soldagem, uma vez que o mesmo aumenta a penetração do metal de solda.
- Medir e comparar o teor de hidrogênio difusível entre as soldas feitas com diferentes teores de carbono no metal de adição.
- Desenvolver um mecanismo para soldagem subaquática robotizada que permita controlar a tensão de soldagem ao longo da solda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN WELDING SOCIETY, **Specification for Underwater Welding**, ANSI AWS D.3.6M, 1999.
2. ANDRADE, L. G. D., SILVA, W. C. D., PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q. **Comparação entre a Soldagem Subaquática Molhada na Posição Vertical e na Posição Plana**. V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Salvador – Bahia. CONEM, 2008.
3. 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.
4. ASM INTERNATIONAL, **Welding, Brazing and Soldering**, Vol. 6, ASM HANDBOOK, 1993.
5. BRACARENSE, A. Q., **Shielded Metal Arc Welding Electrode Heating Control by Flux Ingredients Substitution**, Golden, Colorado, EUA: Colorado School of Mines, Tese, 1994.
6. BRACARENSE, A. Q. e PESSOA, E. C. P., **Wet Welding in Fresh Water**, Second Project Report, Submitted to Colorado School of Mines, 2003.
7. BRACARENSE, A. Q. e PESSOA, E. C. P., **Wet Welding in Fresh Water**, Third Project Report, Submitted to Colorado School of Mines, 2004.
8. BRANDI, S., TANIGUCHI, C. e LIU, S., **Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding**, Welding Journal 70(10): 261s-270s, 1991.
9. CAMPBELL, J., **Castings**, Elsevier. Online version available at: <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=711&VerticalID=0>, 2001.

10. CHEW, B., **Prediction of Weld Metal Hydrogen Levels Obtained Under Test Conditions**, Welding Journal, Vol. 52, pp. 386s-391s, 1973.
11. CHRISTENSEN, N., **The Metallurgy of Underwater Welding**, Underwater Welding, Pergamon Press, p 71-79, 1983.
12. 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, 2003.
13. GOOCH, T. G., **Properties of Underwater Welds. Part 1. Procedures Trials**, Metal Construction, pp.164-167,vol.8, March, England, 1983.
14. GRONG, O., **Metallurgical Modelling of Welding**, (2th Edition), Woodhead Publishing. Online version available at: <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=1281&VerticalID=0>, 1997.
15. GRUBBS, C. E., BERTELMANN, A. E., IBARRA, S., LIU, S., MARSHALL, D. J., OLSON, D. L., **Welding Handbook Material and Applications**, Part 1. 8^o Edition, Vol. 3. American Welding Society. Miami: 446-500, 1996.
16. HAUSI, A. e SUGA, Y., **On Cooling of Underwater Welds**, Trans. Jpn. Weld. Soc., Vol. 2 (No. 1), 1980.
17. HEIPLE, C. e ROPER, J., **Mechanism for Minor Element Effect on GTA Fusion Zone Geometry**, Welding Journal, vol. 61, n. 4, pp. 97-102, 1982.
18. IBARRA, S., GRUBBS, C. E. e LIU, S., **State-of-the-Art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel**, Proceedings: International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, New Orleans, Louisiana, pp. 49-67, 1994.

19. INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, IIW, **Classification des Divers Modes de Transfert du Metal en Soudage a L'Arc**, IIW DOC XII-535-77, American Council, AWS, Miami, FL, 1977.
20. JACKSON C. E., **Fluxes and Slags in Welding**, WRC Bulletin 190, Welding Research Council, Vol. 73, pp 1-25, NY, USA, December, 1973.
21. KEENE, B., **Review of Data for the Surface Tension of Iron and its Binary Alloys**, International Material Review, vol.33, n.1, pp. 1-37, 1988.
22. KOU, S., **Welding Metallurgy**, Wiley-Interscience, New Jersey, 2003.
23. KOU, S. AND LIMMANEEVICHITR, C., **Visualization of Marangoni Convection in Simulated Weld Pools Containing a Surface-Active Agent**, Welding Journal, vol.79, n.11, pp. 324-330, 2000a.
24. KOU, S. AND LIMMANEEVICHITR, C., **Visualization of Marangoni Convection in Simulated Weld Pools**, Welding Journal, vol.79, n.5, pp. 126-135, 2000b.
25. LANCASTER, J. F., **The Physics of Welding**, International Institute of Welding, Pergamon Press, 1984.
26. LIU, S., POPE, A., DAEMEN, R., **Welding Consumables and Weldability**, International Workshop on Underwater of Marine Structures. New Orleans, Louisiana, EUA, 1994a.
27. 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.
28. LIU, S. e OLSON, D. L., **The Effect of Altitude in Welding**, ASM International 4th Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, pp. 345-352, Junho, 1995.

29. LIU, S. e PÉREZ, F., **Joint Research Program Between MMS and Pemex/IMP Underwater Wet Welding for Offshore Structures and Pipelines in the Gulf of Mexico: Process Maturation and Technology Transfer**, Final Report Submitted to the Minerals Management Service and Instituto Mexicano del Petroleo, August, 2004.
30. LIU, S. e PEREZ, F., **Phase II Joint Research Program between MMS and Pemex/IMP Underwater Wet Welding for Offshore Structures and Pipelines in the Gulf of Mexico: Process Maturation and Technology Transfer**, Final Report Submitted to the Minerals Management Service and Instituto Mexicano del Petroleo, August, 2006.
31. 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.
32. MILLS, K. C. AND KEENE, B. J., **Factors Affecting Variable Weld Penetration**, International Material Reviews, vol. 35, n.4, pp. 185-216, 1990.
33. NORRISH, J., **Advanced Welding Processes**, New Manufacturing Processes and Materials Series, Institute of Physics Publishing, 1992.
34. PEREZ, F., **Effect of Nickel Additions on Rutile Electrodes for Underwater Welding**, Golden, Colorado, EUA, Colorado School of Mines, Dissertação, 100f , 2003.
35. PEREZ, F., **The Mechanism of Porosity Formation in Underwater Steel Welds using SMAW Process**, Golden, Colorado, EUA, Colorado School of Mines, Tese, 183f, 2007.
36. 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.

37. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P., 2004, **Study of “Re-Melt” Temper Bead and Polarity Effects on Porosity in the Under Freshwater Wet Welds**, Proceedings of OMAE, 23RD International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 20–25, Vancouver, Canada, 2004.
38. PESSOA, E. C. P., **Estudo da Variação da Porosidade ao Longo do Codão em Soldas Subaquáticas Molhadas**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, Tese, 2007.
39. PINTO, L., C. M., **Quanticov um Analisador Microestrutural para Ambiente Windows**, Tese de Doutorado. USP/IPEN. Brasil, 1996.
40. PISTORIUS, P. G. H. e LIU, S., **Changes in Metal Transfer Behaviour during Shielded Metal Arc welding**, Welding Journal, Welding Research supplement, (8), 305s – 315s, 1997.
41. POPE, M. A., **Oxygen and Hydrogen Control in Shield Metal Underwater Wet Welding**, Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, 1995.
42. 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.
43. ROWE, M. D. e LIU, S., **Recent Development in Underwater Wet Welding**, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6, No. 6. pp 387-396, 2001.
44. 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, pp. 156-S-166-S, 2002.
45. SANCHEZ-OSIO, A., **The Influence of Consumable Composition and Solidification on Inclusion Formation and Growth in Low Carbon Steel Underwater Wet Welds**, Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, 1994.

46. SANCHEZ-OSIO, A., LIU, S., IBARRA, S., **Designing Shielded Metal Arc Consumables for Underwater Wet Welding in Offshore Applications**, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 117(3): 212-220, 1995.
47. 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.
48. SILVA, E. A.; HAZLETT, T. H., **Shielded Metal Arc Welding Underwater With Iron-Powdered Electrodes**, Welding Journal, 50 (6), June, 406-415, 1971.
49. 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, Nº 2, October, 144-149, 1990.
50. SUGA, Y., HASUI, A., **On Formation of Porosity in Underwater Weld Metal**, Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 17, Nº. 1, 1986.
51. 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.
52. TREVISAN, R. E., SCHWEMMER, D. D. e OLSON, D. L., **The Fundamentals of Weld Metal Pore Formation**, Welding: Theory and Practice, D.L. Olson, R. D. Dixon and A. L. Liby, Ed., Elsevier Science B. V., 1990.
53. TSAI, C. L. e MASUBUCHI, K., **Interpretive Report on Underwater Welding**, Weld. Res. Counc. Bull., Vol.224, p 1-37, 1977.
54. TSAI, C. L. e MASUBUCHI, K., **Mechanisms of Rapid Cooling in Underwater Welding**, Appl. Ocean Res., Vol 1 (No. 2), p 99-110, 1979.

- 55. XU, X., Study of Metal Transfer Modes in Shielded Metal Arc Welding, MSc. M.S. Thesis, Colorado School of Mines, 1994.**
- 56. 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, Louisiana, USA, pp.201-236, 1994.**

ANEXO A

A.1 Oscilogramas de tensão

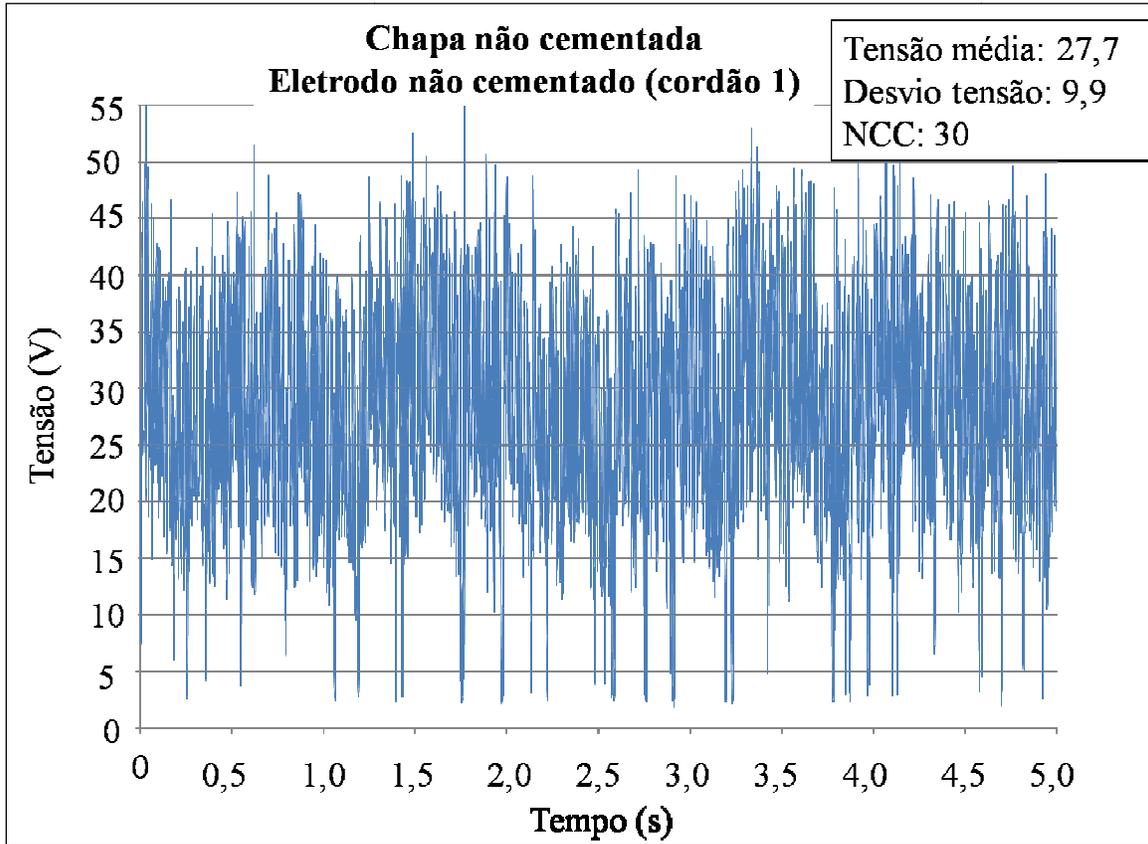


Figura A.1. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo não cementado, cordão 1.

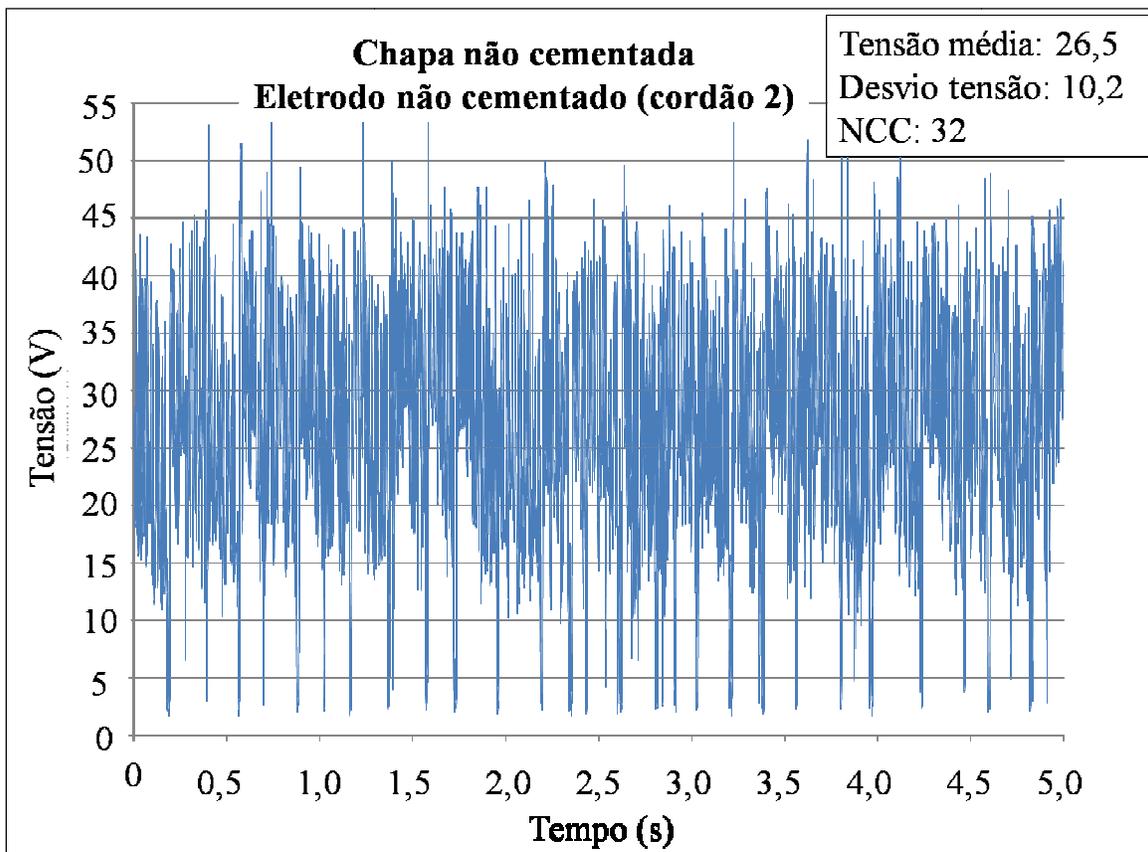


Figura A.2. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo não cementado, cordão 2.

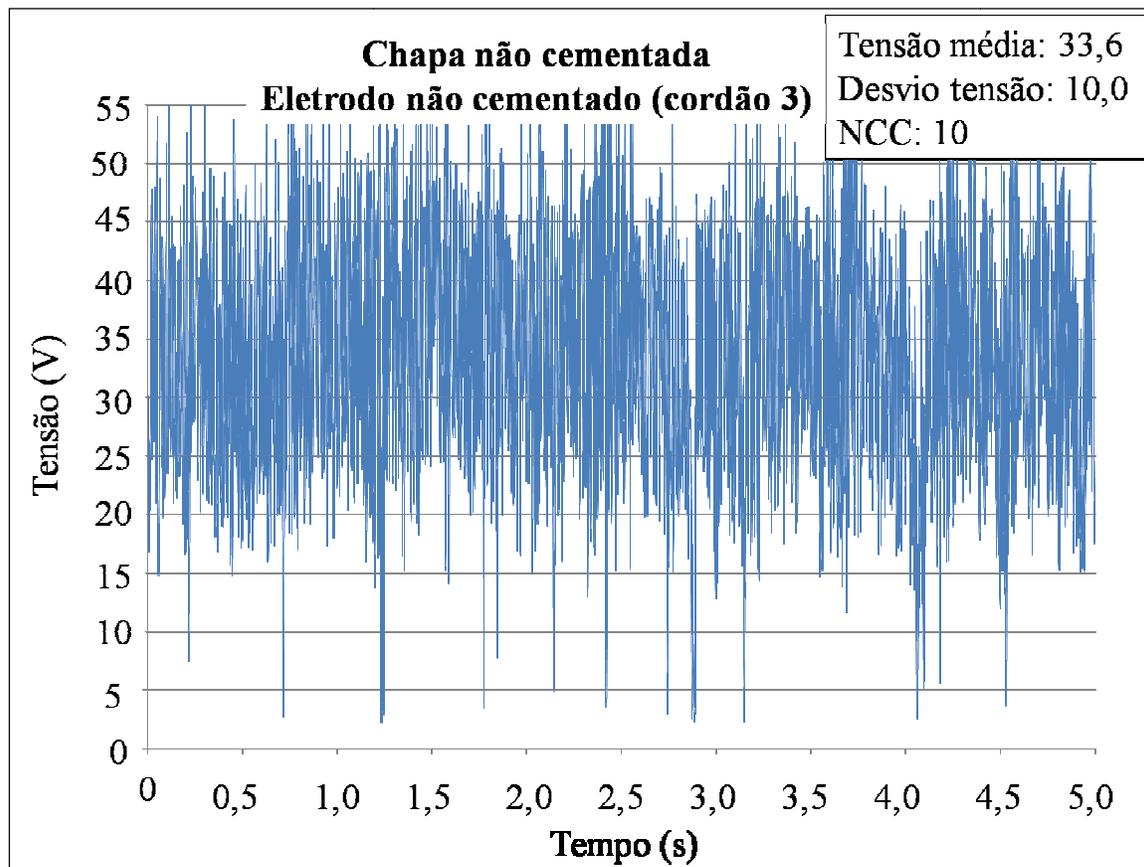


Figura A.3. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo não cementado, cordão 3.

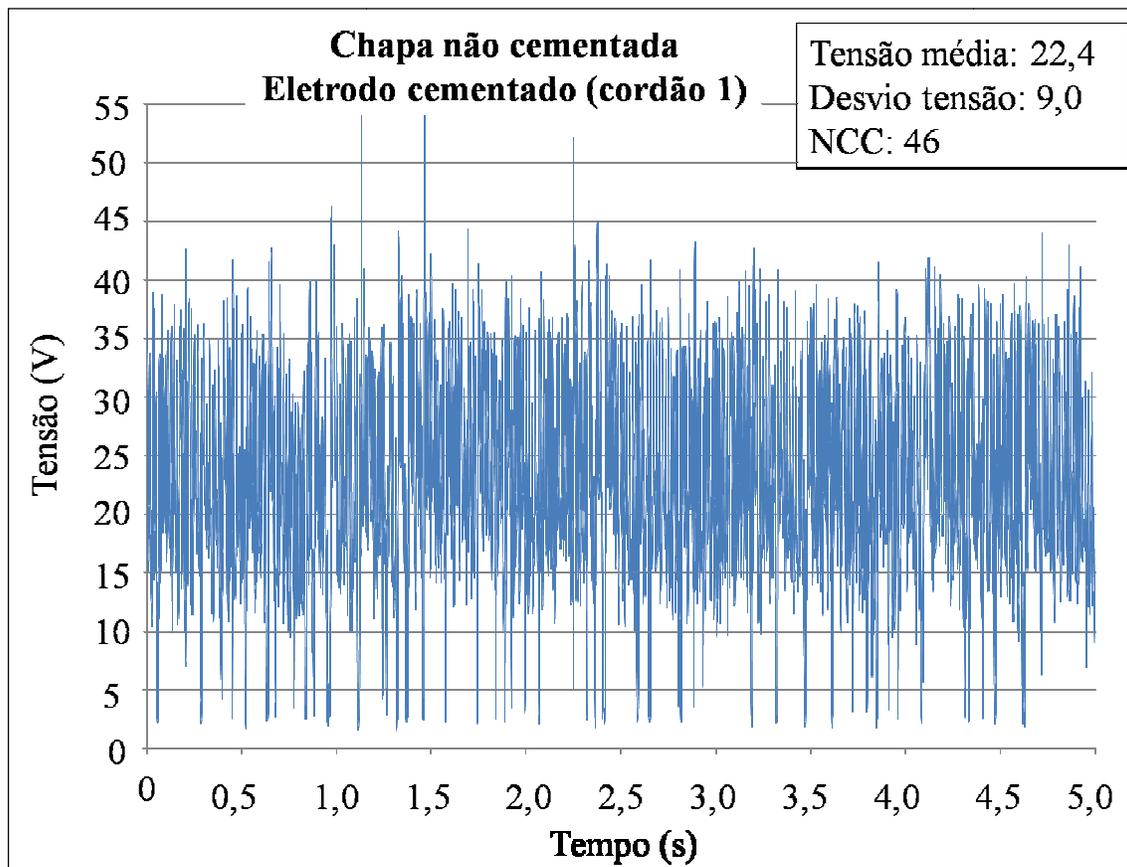


Figura A.4. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo cementado, cordão 1.

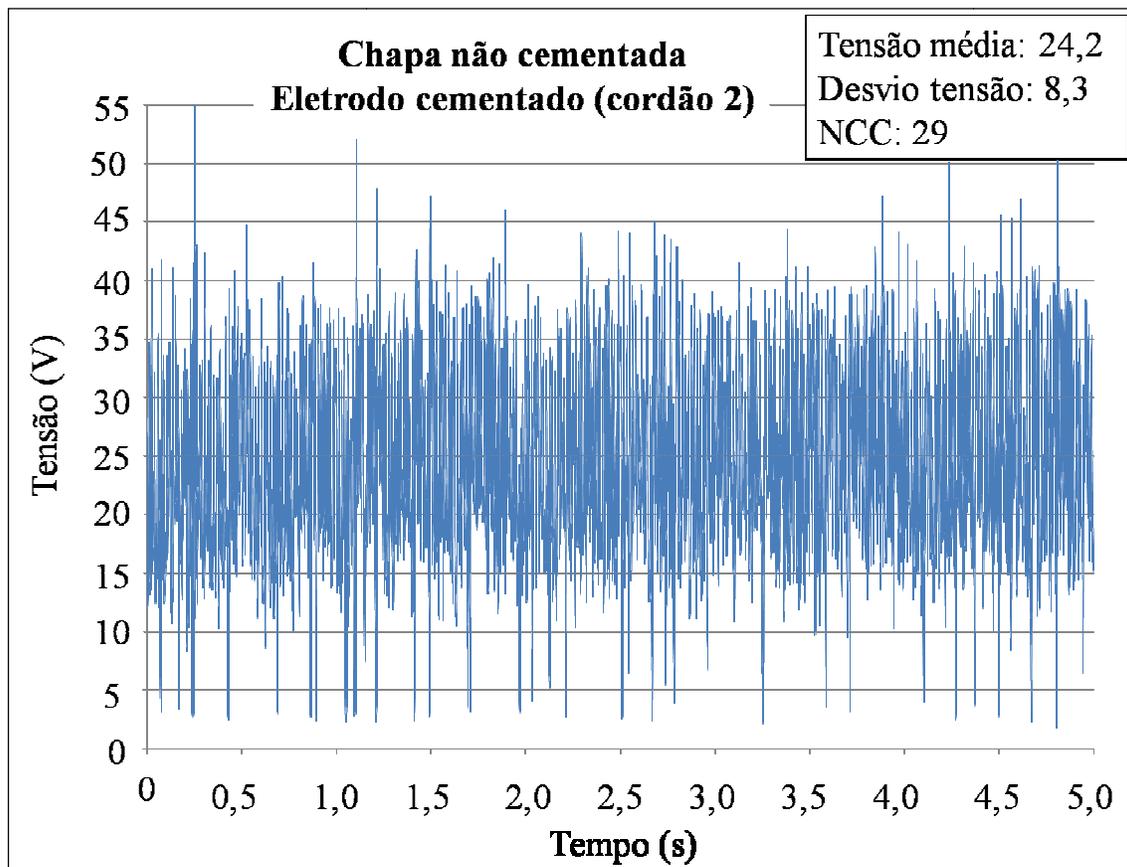


Figura A.5. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo cementado, cordão 2.

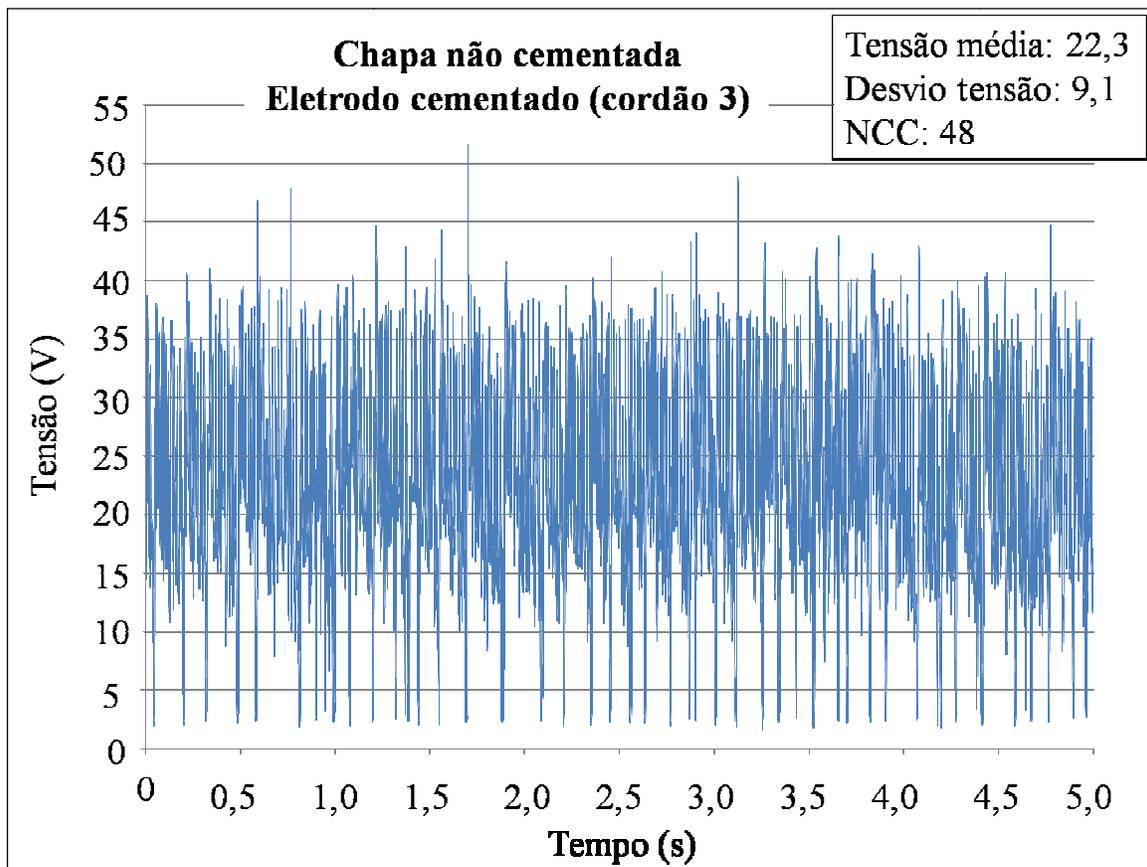


Figura A.6. Oscilograma de tensão. Chapa não cementada e eletrodo cementado, cordão 3.

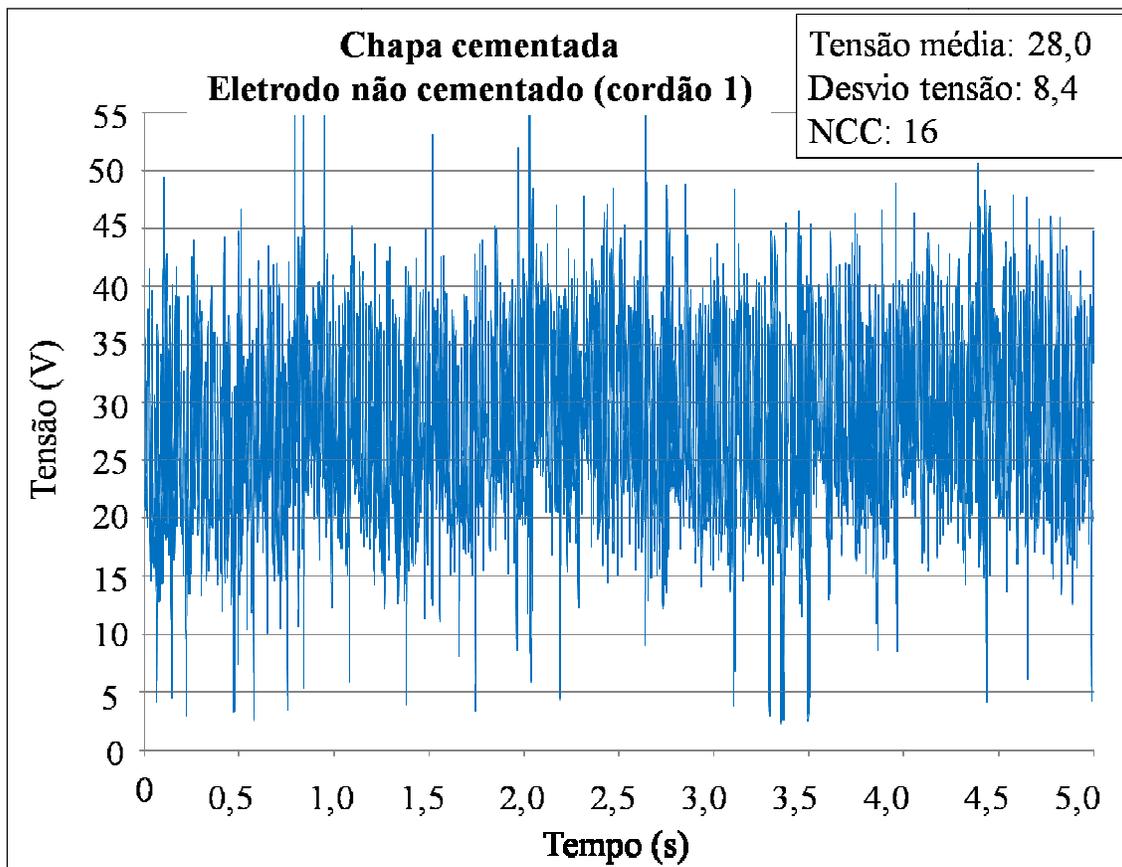


Figura A.7. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo não cementado, cordão 1.

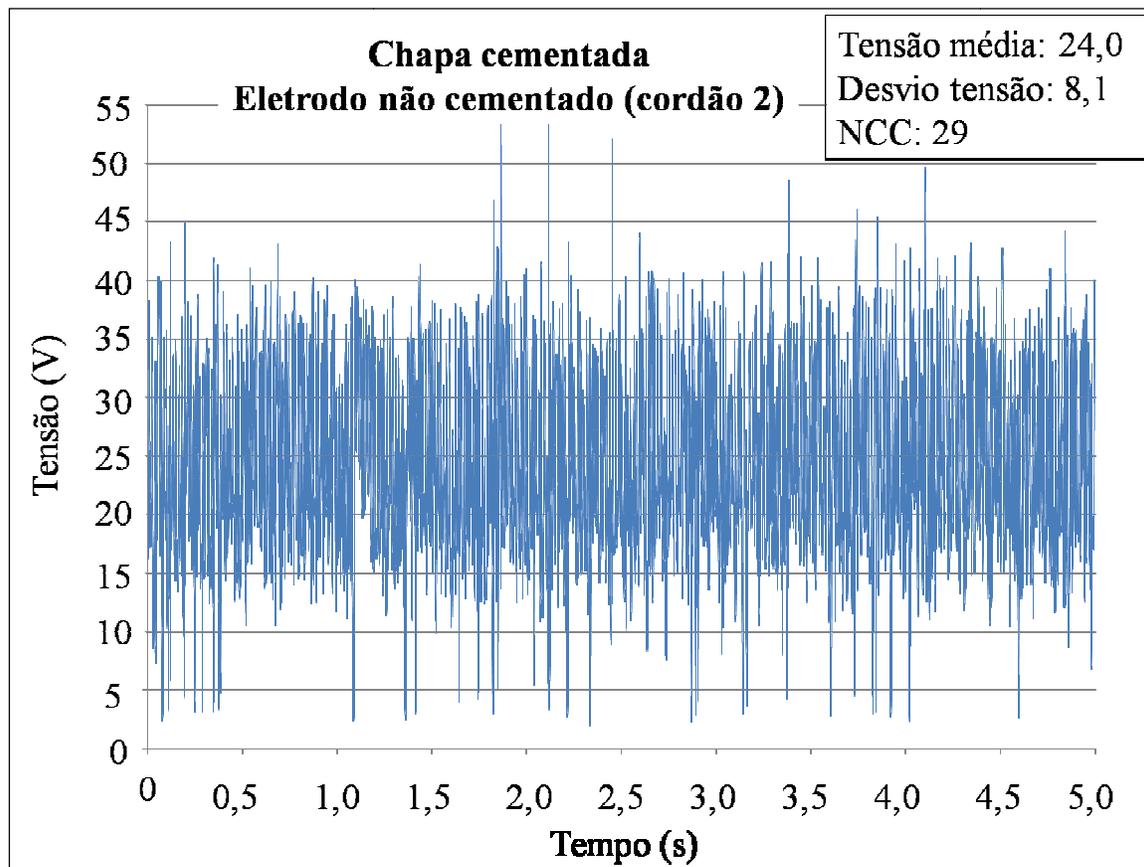


Figura A.8. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo não cementado, cordão 2.

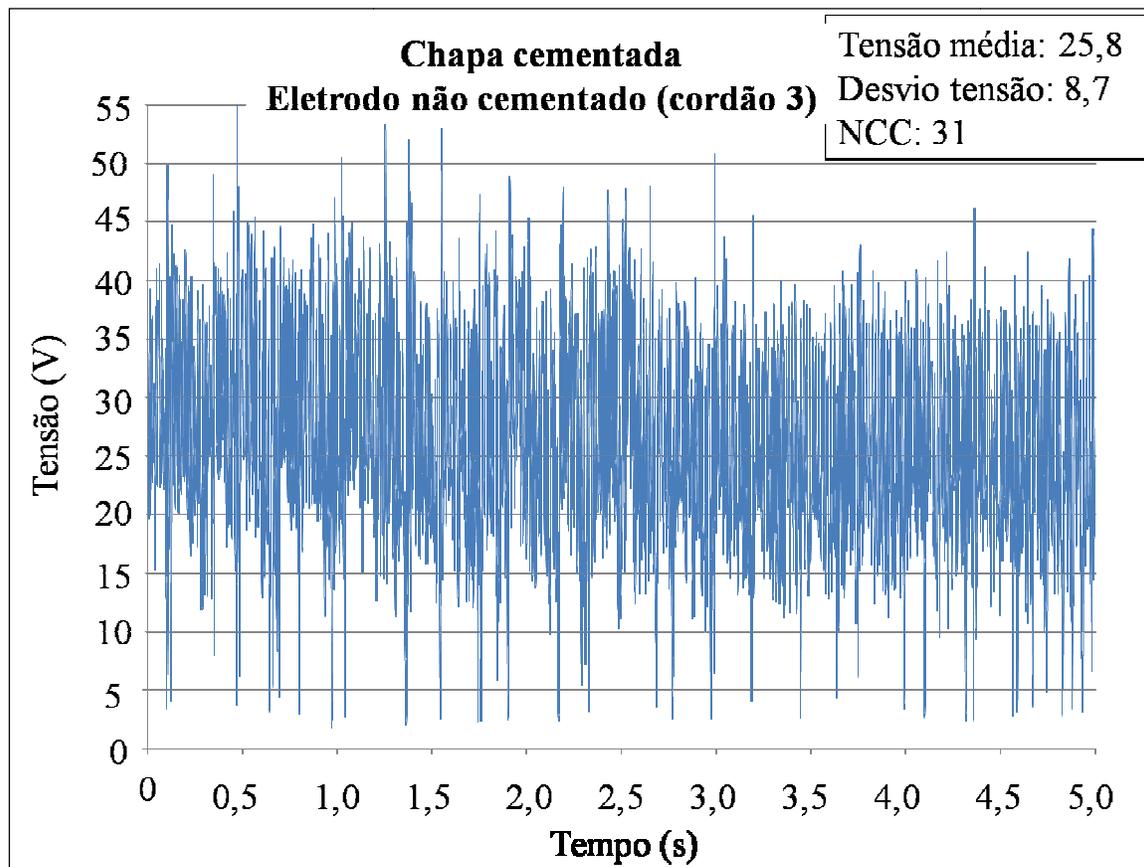


Figura A.9. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo não cementado, cordão 3.

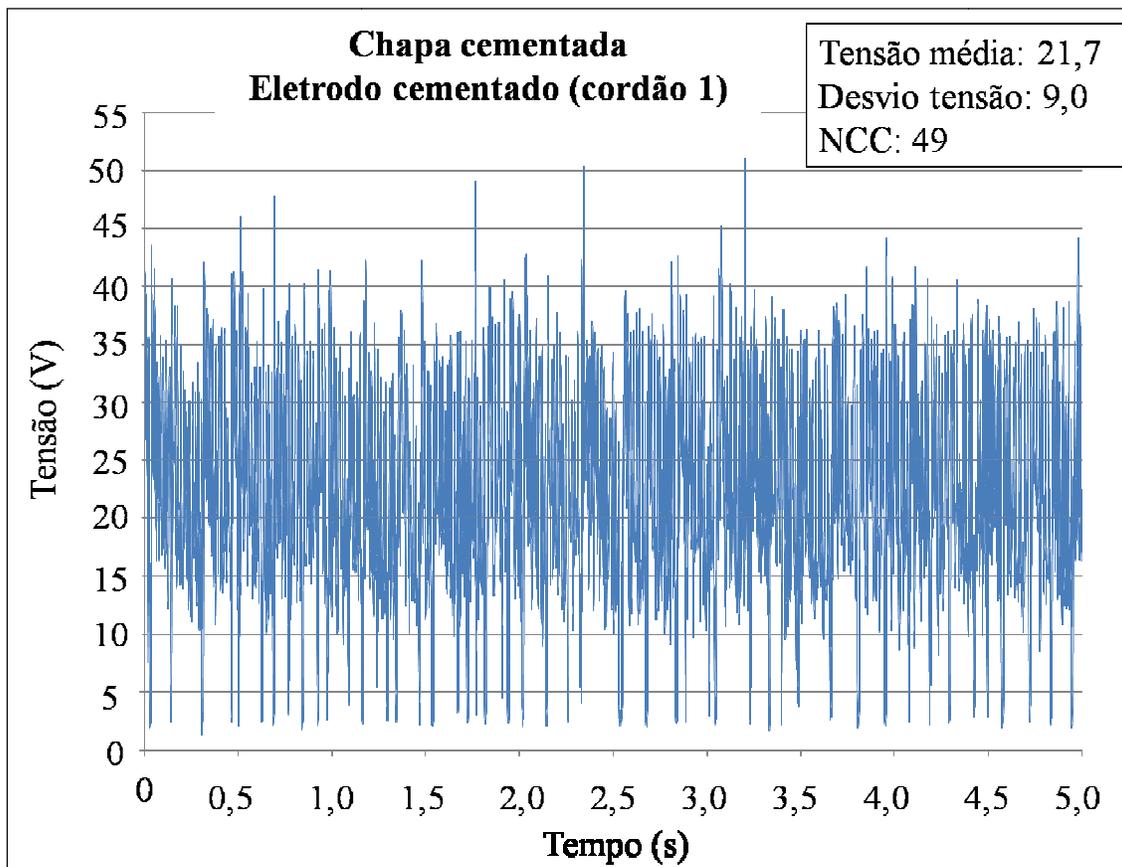


Figura A.10. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo cementado, cordão 1.

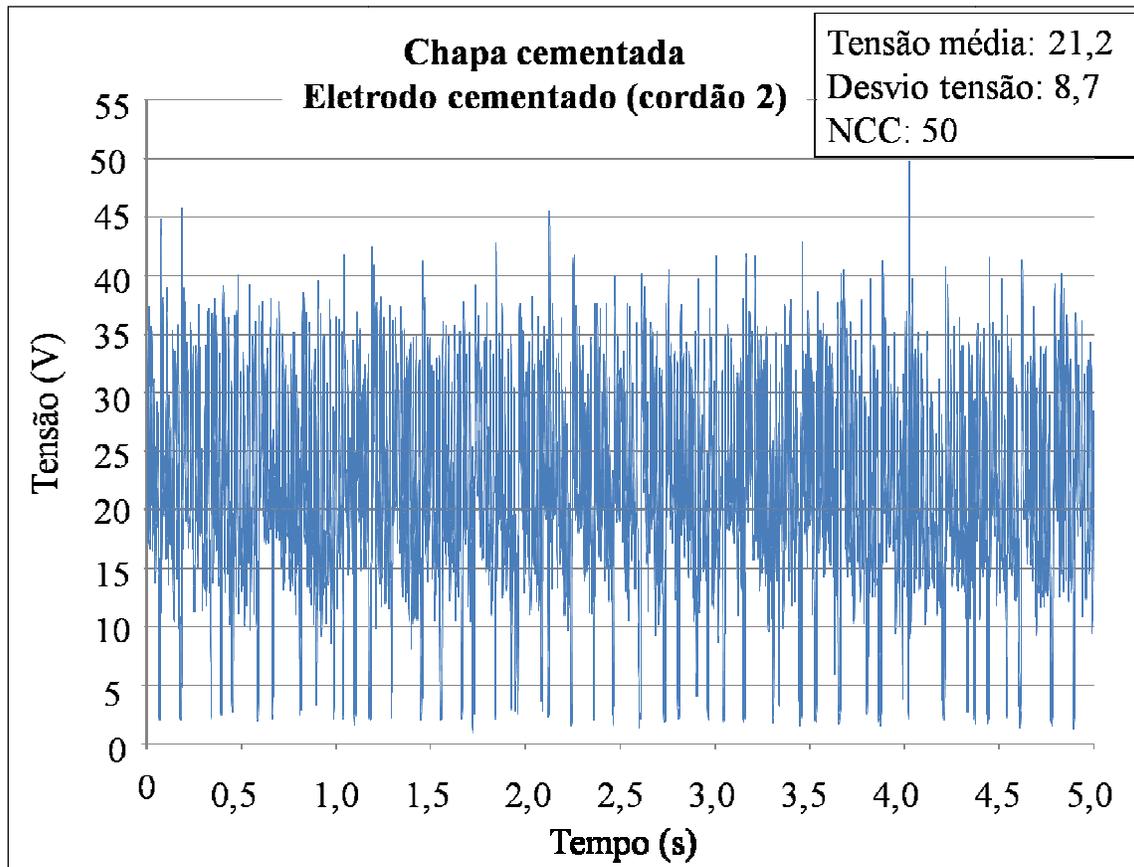


Figura A.11. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo cementado, cordão 2.

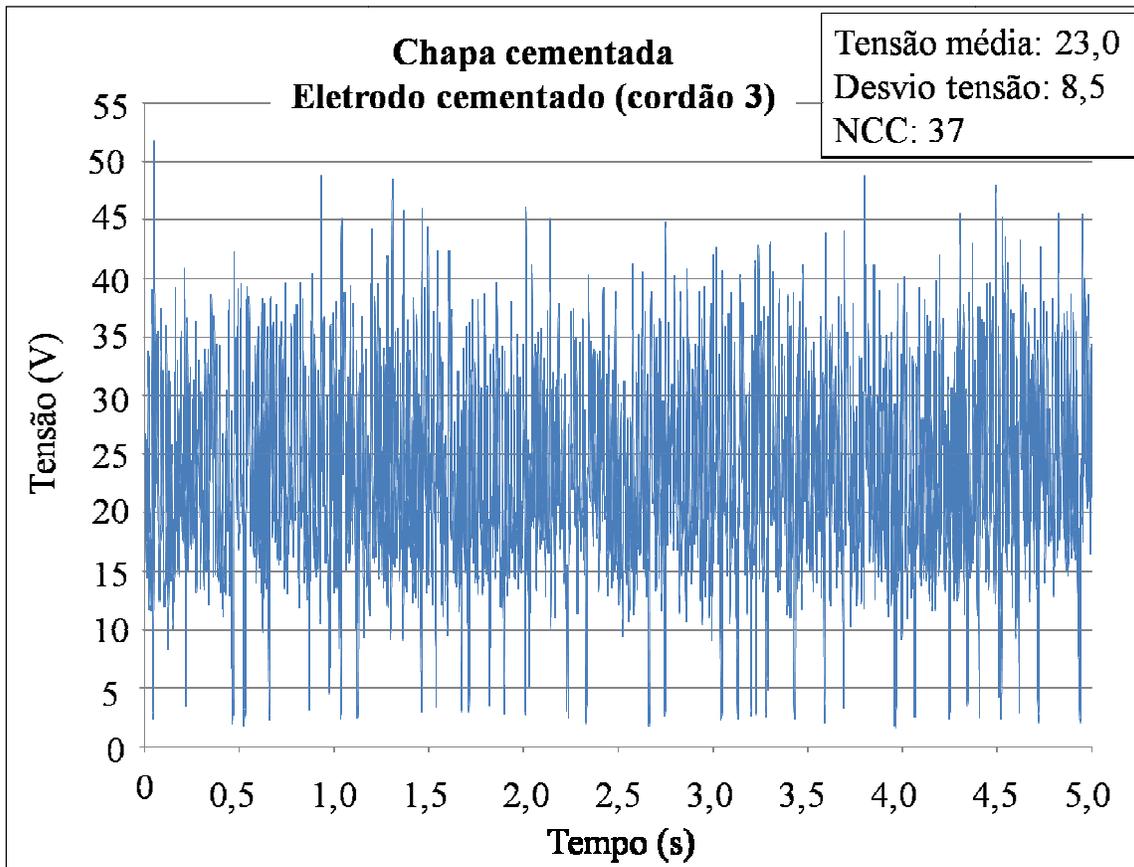


Figura A.12. Oscilograma de tensão. Chapa cementada e eletrodo cementado, cordão 3.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)