



**Fredy Augusto Fuentes Ferreira**

**Avaliação dos Efeitos da Substituição de Hematita por  
Wustita no Revestimento de Eletrodos Oxidantes para  
Soldagem Subaquática Molhada**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC - Rio.

Orientador: Prof. Sidnei Paciornik  
Co-Orientador: Prof. Valter Rocha dos Santos

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009



**Fredy Augusto Fuentes Ferreira**

**Avaliação dos Efeitos da Substituição de  
Hematita por Wustita no Revestimento de  
Eletrodos Oxidantes para Soldagem  
Subaquática Molhada**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Sidnei Paciornik**

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Dr. Prof. Valter Rocha dos Santos**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Profa. Ivani de Souza Bott**

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Prof. Ezequiel Caires Pereira Pessoa**

Departamento de Engenharia Mecânica - UFMG

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de setembro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e dos orientadores.

### **Fredy Augusto Fuentes Ferreira**

Formação: Graduou-se em Engenharia Metalúrgica na Universidade Industrial de Santander em 2000. Desenvolveu junto com a PUC-RIO uma pesquisa sobre a Avaliação dos Efeitos da Substituição de Hematita por Wustita no Revestimento de Eletrodos Oxidantes para Soldagem Molhada

#### Ficha Catalográfica

Ferreira, Fredy Augusto Fuentes

Avaliação dos Efeitos da Substituição de Hematita por Wustita no Revestimento de Eletrodos Oxidantes para Soldagem Subaquática Molhada / Fredy Augusto Fuentes Ferreira; orientadores: Sidnei Paciornik, Valter Rocha dos Santos - 2009.

100 f.: il. (color); 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de Materiais – Teses. 2. Soldagem subaquática molhada. 3. Hematita. 4. Wustita. 5. Eletrodo oxidante. 6. Inclusões. 7. Microscopia. 8 Análise de Imagens. I. Paciornik, Sidnei. II. Santos, Valter Rocha dos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

Para meus pais **Myriam e Baudilio** e  
as minhas irmãs pelo amor e apoio  
incondicional nos momentos de felicidade  
e de dificuldade e por me incentivar para ir  
além das minhas expectativas.

## Agradecimentos

À Deus, quem sempre ilumina meu caminho.

Ao meu orientador, **Sidnei Paciornik**, por me acolher desde o primeiro momento que o conheci e confiar nas minhas capacidades como orientando. Por ser um grande, dedicado, excelente e paciente professor. Obrigado por me incentivar a cada dia desde o início para meu desenvolvimento na área acadêmica e pessoal. Obrigado por estar presente e pela valiosa ajuda que me brindou nos momentos difíceis que passei durante o transcurso do mestrado, fazendo me sentir em casa. Obrigado também por continuar transmitindo seus conhecimentos após a realização deste estudo e ser uma das pouquíssimas pessoas mais agradáveis, atenciosas e sinceras que eu já tive oportunidade de conhecer.

Ao meu co-orientador **Valter Rocha dos Santos**, por me oferecer este maravilhoso projeto e a confiança para conseguir desenvolvê-lo. Obrigado por ser como um pai que apóia, mas que também sabe cobrar o justo. Por me transmitir parte dos seus conhecimentos e por me ensinar a atuar, pensar e trabalhar de maneira individual, mas estando presente e corrigindo os meus erros em todo momento durante o desenvolvimento deste projeto e por contribuir em muito no meu crescimento acadêmico.

A coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pela bolsa concedida durante parte da realização deste mestrado, o que contribuiu para a viabilização desta dissertação.

Ao conselho Nacional de Pesquisa – CNPq – pela bolsa concedida durante parte da realização deste mestrado, o que contribuiu para a viabilização desta dissertação.

A **Marcos Henrique**, por sua valiosíssima colaboração na aquisição das imagens do MEV e MO para o desenvolvimento desta pesquisa e pelo ensinamento na manipulação do Microscópio Ótico. Também por sua amizade durante e após estes dois anos de estudo.

A **Maurício Monteiro** pela incondicional ajuda na aquisição das imagens do MEV.

A **Ronaldo Pedro**, pelo apoio na aquisição dos difratogramas das amostras

ao longo da minha dissertação.

A **Ricardo Alencar e Adriana Rebello**, meus professores de português, por me ensinar esta difícil e encantadora língua que aprendi e persisto em melhorar cada dia mais ao longo da minha estada aqui no Brasil.

A **Heitor Nuss Guimarães** pela valiosa colaboração na parte metalográfica deste trabalho.

A **Alexandre Queiroz Bracarense, Ezequiel Caires Pereira**, e a equipe do departamento de Engenharia Mecânica da UFMG pela parceria e apoio na fabricação e soldagem dos eletrodos.

A meu amigo **Martin** pela grande amizade, conselhos e colaboração e a **Rafael, Alex, Johanna, Gerónimo, Patricia, Cecilia, Karla, Paulo, Fernando, Ana Karla, Ana Paula e Luciana** pelo apoio de uma ou outra forma ao longo do meu mestrado.

A todos os professores e funcionários do DEMa, pelos valiosos ensinamentos e ajuda.

A todos os amigos e pessoas que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

## Resumo

Ferreira, Fredy Augusto Fuentes; Paciornik, Sidnei; Santos, Valter Rocha dos. **Avaliação dos Efeitos da Substituição de Hematita por Wustita no Revestimento de Eletrodos Oxidantes para Soldagem Subaquática Molhada**. Rio de Janeiro, 2009, 100p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A soldagem subaquática molhada é uma das técnicas utilizadas no reparo de plataformas submarinas para extração de petróleo e gás, tendo uma grande expansão no mundo atual. Sua maior vantagem frente a outros processos de soldagem se deve a sua simplicidade e facilidade de mobilização, já que permite ao mergulhador trabalhar diretamente sobre as partes submersas das peças sem a proteção de um ambiente artificial, como na tradicional solda a seco. Neste tipo de soldagem são usados tanto eletrodos oxidantes quanto eletrodos rufílicos. Neste trabalho busca-se avaliar os efeitos da utilização de Wustita em substituição parcial à Hematita, mineral empregado no revestimento de eletrodos oxidantes. Foram produzidos 5 grupos de eletrodos mantendo fixa a porcentagem em peso do total de óxidos de ferro e variando as proporções de FeO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Realizaram-se soldas de 4 passes em posição plana com ângulo de 60° de inclinação entre o eletrodo e a chapa a 0.5m de profundidade. Os metais soldados foram avaliados por análise química, microscopia, hidrogênio difusível e micro dureza. Desenvolveram-se métodos de análise digital de imagens, para medir fração de área de inclusões a partir de imagens de MO e MEV, e a fração de micro-constituintes por MO. Os resultados mostraram um aumento de ferrita pró-eutetóide com o aumento da wustita e uma diminuição com a fração de carbono. Esta, por sua vez, decresceu com o aumento da wustita. A micro-dureza decresceu com a fração de wustita e cresceu com a fração de carbono.

## Palavras-chave

Soldagem subaquática molhada; Hematita; Wustita; eletrodo oxidante; inclusões; microscopia; análise de imagens.

## Abstract

Ferreira, Fredy Augusto Fuentes; Paciornik, Sidnei (Advisor); Santos, Valter Rocha dos. **Evaluation of the Effects of Replacement of Hematite by Wustite on Oxidizing Electrodes Coating for Underwater Wet Welding**. Rio de Janeiro, 2009, 100p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Underwater wet welding is one of the techniques used in the repair of underwater oil and gas platforms, with a large expansion in the world nowadays. Its major advantage over other welding processes is due to its simplicity and ease of deployment, as it allows the diver to work directly on the submerged portions of the parts without the protection of an artificial environment, as in the traditional dry welding. Both oxidizing and rutilic electrodes are used in this type of welding. In this study we assessed the effects of the use of wustite in partial replacement of Hematite, a mineral used in the coating of oxidizing electrodes. Five groups of electrodes were produced with a fixed percentage of the total weight of iron oxide and varying proportions of FeO and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Four pass welds in the flat position with 60° angle of inclination between the electrode plate and a 0.5m deep were performed. Weld metals were evaluated by chemical analysis, microscopy, diffusible hydrogen and micro-hardness. Digital image analysis methods were developed to measure inclusion area fraction from OM and SEM images, and the fraction of micro-constituents by OM. The results showed an increase of pro-eutectoid ferrite with increasing wustite content and a decrease with increasing carbon content, which, by its turn, decreased with increasing wustite content. Micro-hardness decreased with wustite content and increased with carbon content

## Keywords

Underwater wet welding; hematite; wustite; oxidizing electrode; inclusions; microscopy; image analysis.

# Sumário

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1      | Introdução  | 17 |
| 2      | Revisão Bibliográfica   | 21 |
| 2.1.   | Efeito do ambiente aquoso sobre a qualidade da solda molhada        | 22 |
| 2.2.   | Absorção de oxigênio durante a solda                                | 23 |
| 2.3.   | Modificações na composição química                                  | 28 |
| 2.4.   | Evolução microestrutural das soldas subaquáticas molhadas           | 30 |
| 2.5.   | Absorção de Hidrogênio na solda                                     | 36 |
| 2.6.   | Porosidade  | 40 |
| 2.7.   | Trincamento Induzido pelo Hidrogênio                                | 41 |
| 2.8.   | Efeito dos eletrodos oxidantes sobre o teor de hidrogênio difusível | 43 |
| 3      | Objetivo  | 45 |
| 4      | Materiais e Métodos Experimentais                                   | 46 |
| 4.1.   | Introdução  | 46 |
| 4.2.   | Materiais   | 46 |
| 4.2.1. | Metal base  | 47 |
| 4.2.2. | Arames  | 47 |
| 4.2.3. | Revestimento  | 48 |
| 4.3.   | Procedimento de Fabricação dos Eletrodos                            | 52 |
| 4.4.   | Procedimento de Soldagem  | 55 |
| 4.5.   | Preparação dos corpos de prova                                      | 57 |
| 4.6.   | Análise de Inclusões  | 58 |
| 4.6.1. | Análise de Imagens de MO  | 59 |
| 4.6.2. | Análise de Imagens de MEV   | 61 |
| 4.7.   | Análise de Micro-constituintes                                      | 63 |

|   |    |
|---|----|
| 4.7.1. Aquisição de Imagens em Mosaico          | 63 |
| 4.7.2. Quantificação Semi-automática            | 64 |
| 4.8. Hidrogênio difusível                       | 66 |
| 4.9. Análise de micro-dureza                    | 66 |
| <br>  |    |
| 5 Resultados                                    | 67 |
| 5.1. Características operacionais dos eletrodos | 67 |
| 5.2. Caracterização do metal de solda           | 69 |
| 5.2.1. Análise Química                          | 69 |
| 5.2.2. Caracterização microestrutural           | 72 |
| 5.2.2.1. Análise dos micro-constituintes        | 72 |
| 5.2.2.2. Análise das inclusões                  | 78 |
| 5.2.3. Hidrogênio difusível                     | 78 |
| 5.2.4. Análise de micro-dureza                  | 79 |
| <br>  |    |
| 6 Discussão                                     | 83 |
| <br>  |    |
| 7 Conclusões                                    | 88 |
| <br>  |    |
| 8 Referências Bibliográficas                    | 89 |
| <br>  |    |
| 9 Apêndice                                      | 93 |
| 9.1. Macros desenvolvidas:                      | 93 |
| 9.2. Aquisição de imagens em mosaico            | 98 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Desenho esquemático mostrando a transmissão de calor na soldagem sob condição atmosférica (a) e subaquática (b) (Pope, Medeiros, Liu, 1995)  | 19 |
| Figura 2 – Diagrama Richardson-Ellingham da energia livre de Gibbs <i>versus</i> temperatura para oxidação de metais (Gaskell, 1981)  | 23 |
| Figura 3 – Diagrama de equilíbrio Ferro-Oxigênio (Van Vlack, 1977)  | 24 |
| Figura 4 – a) Efeitos da pressão parcial de CO <sub>2</sub> e do teor do Mn no conteúdo de O <sub>2</sub> de metais de solda depositados pelo processo GMAW (Kuwana e Sato, 1990) e b) efeito da profundidade de soldagem nos teores de O <sub>2</sub> e Mn de soldas molhadas depositadas com eletrodo rutilico (Ibarra, Grubbs e Olson, 1987) | 25 |
| Figura 5 – Teor de oxigênio de metais de solda molhada em função da quantidade de hematita no revestimento dos eletrodos. Profundidade de soldagem em água doce de 0.5m (Pope, Liu e Olson, 1994)   | 27 |
| Figura 6 – Quantidade de inclusões em soldas feitas pelo processo GMAW em função da pressão parcial de oxigênio no gás de proteção (Kuwana e Sato, 1986)  | 27 |
| Figura 7 – Produto do teor de carbono e oxigênio do metal de solda em função da profundidade da soldagem (Ibarra, Grubbs e Olson, 1987)   | 29 |
| Figura 8 – Influência da taxa de resfriamento sobre a formação de microestruturas específicas do metal de solda (Liu e Olson, 1986; Abson e Pargeter, 1986)   | 32 |
| Figura 9 – Influência do conteúdo de manganês e oxigênio do metal de solda sobre a temperabilidade da solda (Liu e Olson, 1986; Abson e Pargeter, 1986)   | 33 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 10 – Porcentagem dos constituintes microestruturais do metal de solda para soldas subaquáticas molhadas como uma função da profundidade da água<br>(Ibarra, Grubbs e Olson, 1988)   | 34 |
| Figura 11 – Esquema proposto para fazer um gráfico da temperatura <i>versus</i> logaritmo do tempo ilustrando as curvas de nucleação para as diferentes morfologias de ferrita do metal de solda em soldas subaquáticas molhadas<br>(Olson e Ibarra, 1986) | 35 |
| Figura 12 – Faixa de teor de ferrita acicular no gráfico de conteúdo de oxigênio do metal de solda <i>versus</i> endurecimento do metal de solda (Kikuta et al., 1980)   | 36 |
| Figura 13 – Diagrama de composição sugerido para prever a microestrutura do metal de solda para soldas subaquáticas molhadas com eletrodo E6013 (Kikuta et al., 1980)  | 36 |
| Figura 14 – Solubilidade do hidrogênio em vários metais em função da temperatura (Lancaster, 1993)   | 37 |
| Figura 15 – Efeitos da pressão da soldagem na porosidade de metais de solda molhada. a) Porosidade medida como densidade relativa de solda (Ando e Asahina, 1983).<br>b) Porosidade medida em porcentagem volumétrica (Suga e Hasui, 1986)                 | 38 |
| Figura 16 – Teores de hidrogênio total, difusível ou residual de soldas molhadas produzidas por eletrodos com revestimentos básicos, rufílicos ou oxidantes (Gooch, 1983)  | 39 |
| Figura 17 – Relação entre $\Delta t_{800-500^{\circ}\text{C}}$ e a entrada de calor em chapas para soldas secas e molhadas de um aço de 25 mm de espessura   | 42 |
| Figura 18 – Dependência do hidrogênio difusível do metal de solda sobre o poder de eletrodos oxidantes (Reeves, 1945)  | 44 |
| Figura 19 – Relação entre hidrogênio difusível e o conteúdo de oxigênio total em metais de solda (Reeves, 1945).   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 20 – Materiais utilizados como ingredientes no revestimento. (a) Wustita, (b) Hematita, (c) CMC, (d) Feldspato de potássio, (e) Ferro-Manganês, (f) Sílica, (g) Silicato de potássio. | 50 |
| Figura 21 – Difratoograma da carepa moída  | 51 |
| Figura 22 – Equipamento utilizado na fabricação dos eletrodos  | 53 |
| Figura 23 – Peça onde é introduzido o arame e que é manipulada até sair o eletrodo   | 53 |
| Figura 24 – Processo de fabricação dos eletrodos e secagem dos mesmos  | 55 |
| Figura 25 – Equipamento para a soldagem e chapa mostrando a posição de solda   | 56 |
| Figura 26 – Esquema ilustrativo da soldagem da chapa mostrando os quatro passes feitos   | 57 |
| Figura 27 – Exemplo de corte das amostras para análise química e metalográfica   | 57 |
| Figura 28 – Laboratório de Microscopia Digital (DEMa PUC-Rio) (Reis, 2007)   | 58 |
| Figura 29 – Exemplos de imagens obtidas no MO e no MEV   | 59 |
| Figura 30 – Seqüência de processamento de imagens para análise de inclusões (MO). Vide texto. A seta na imagem f mostra um objeto não circular eliminado.                                    | 61 |
| Figura 31 – Seqüência de processamento de imagens para análise de inclusões (MEV)  | 62 |
| Figura 32 – Exemplo de overview obtido no MO de uma amostra. A seta em preto mostra exemplo dos mosaicos e a seta em vermelho a direção de obtenção dos mesmos.                              | 64 |
| Figura 33 – Imagem mostrando a grade de 100 pontos devidamente identificada  | 65 |
| Figura 34 – Ampliação de uma região da figura anterior para visualizar claramente a marcação dos pontos.   | 65 |
| Figura 35 – Fotomicrografia das soldas feitas  | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 36 – Exemplo típico da relação entre a corrente e a tensão para um primeiro passe. (a) Amostra A (0% de wustita). (b) Amostra C (20% de wustita).                                    | 69 |
| Figura 37 – Relação entre as frações de wustita e de carbono  | 70 |
| Figura 38 – Relação entre as frações de wustita e de manganês   | 71 |
| Figura 39 – Relação entre as frações de wustita e de silício  | 71 |
| Figura 40 – Relação entre as frações de wustita e dos elementos C, Mn e Si  | 71 |
| Figura 41 – Aspecto micrográfico da amostra com 0% FeO. A seta em cores vermelha, verde e azul indica, respectivamente, ferrita pró-eutetoide, ferrita com segunda fase e ferrita acicular. | 72 |
| Figura 42 – Aspecto micrográfico da amostra com 10% FeO.  | 73 |
| Figura 43 – Aspecto micrográfico da amostra com 20% FeO.  | 73 |
| Figura 44 – Aspecto micrográfico da amostra com 30% FeO.  | 74 |
| Figura 45 – Aspecto micrográfico da amostra com 66% FeO.  | 74 |
| Figura 46 – Relação entre as cinco amostras com a fração de ferrita pró-eutetoide   | 75 |
| Figura 47 – Relação entre as cinco amostras com a fração de ferrita com segunda fase  | 75 |
| Figura 48 – Relação entre as cinco amostras com a fração de ferrita acicular  | 76 |
| Figura 49 – Relação entre a fração de wustita e a fração de ferrita pró-eutetoide   | 76 |
| Figura 50 – Relação entre a fração de wustita e a fração de ferrita com segunda fase  | 77 |
| Figura 51 – Relação entre a fração de wustita e a fração de ferrita acicular  | 77 |
| Figura 52 – Relação entre as cinco amostras com a fração de cada uma das microestruturas  | 77 |
| Figura 53 – Relação entre a fração de wustita com a fração  |    |

|  |     |
|--|-----|
| de área de inclusões no MO   | 78  |
| Figura 54 – Relação entre a fração de wustita e a fração de área de inclusões no MEV.                      | 78  |
| Figura 55 – Valores de hidrogênio difusível para cada uma das amostras                                     | 79  |
| Figura 56 – Relação entre a micro-dureza e fração de wustita.  | 80  |
| Figura 57 – Relação entre a micro-dureza e a fração de carbono   | 80  |
| Figura 58 – Relação entre a micro-dureza e a fração de manganês  | 80  |
| Figura 59 – Relação entre a micro-dureza e a fração de silício   | 81  |
| Figura 60 – Relação entre a micro-dureza e a fração de carbono equivalente                                 | 81  |
| Figura 61 – Relação entre a micro-dureza e a fração de ferrita pró-eutetoide                               | 81  |
| Figura 62 – Relação entre a micro-dureza e a fração de ferrita com segunda fase                            | 82  |
| Figura 63 – Variações dos teores de C e Mn, da $V_m$ média e de NCC médio <i>versus</i> fração de wustita. | 85  |
| Figura 64 – Fração de ferrita pró-eutetoide em função do teor de manganês                                  | 86  |
| Figura 65 – Fração de ferrita pró-eutetoide em função do teor de carbono                                   | 86  |
| Figura 66 – Overview da amostra A  | 99  |
| Figura 67 – Overview da amostra B  | 99  |
| Figura 68 – Overview para a amostra C  | 99  |
| Figura 69 – Overview para a amostra D  | 100 |
| Figura 70 – Overview para a amostra E  | 100 |

## Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Composição química do metal de base das duas etapas                                   | 47 |
| Tabela 2 – Composição química dos arames dos eletrodos   | 48 |
| Tabela 3 – Formulação dos revestimentos dos eletrodos – Aglomerante versus Fases Sólidas         | 51 |
| Tabela 4 – Formulação dos revestimentos dos eletrodos – Variação da fração de hematita e wustita | 52 |
| Tabela 5 – Características operacionais da soldagem  | 68 |
| Tabela 6 – Composição química dos metais de solda (% em peso)                                    | 70 |
| Tabela 7 – Resultados de hidrogênio difusível  | 79 |