

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Luciana Ferreira Silva**

**Influência do Molibdênio em Propriedades do Metal de  
Solda na Soldagem Molhada com Eletrodos Oxi-Rutílicos**

**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. Fernando Cosme Rizzo Assunção  
Co-Orientador: Prof. Sidnei Paciornik  
Co-Orientador: Prof. Valter Rocha dos Santos

Rio de Janeiro  
Agosto de 2010



**Luciana Ferreira Silva**

**Influência do Molibdênio em Propriedades do Metal de Solda na Soldagem Molhada com Eletrodos Óxi-Rutílicos**

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. Fernando Cosme Rizzo Assunção**

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Prof. Sidnei Paciornick**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Prof. Valter Rocha dos Santos**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

**Prof. Ivani de Souza Bott**

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

**Prof. Ezequiel Caires Pereira Pessoa**

UFMG

**José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro

Agosto de 2010

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

### **Luciana Ferreira Silva**

Formada em Física pela Faculdade Moacyr Sreder Bastos em 2006. As áreas de atual interesse são Ciência dos Materiais e Soldagem Subaquática Molhada.

#### Ficha Catalográfica

Silva, Luciana Ferreira

Influência de molibdênio em propriedades de metal na solda na soldagem molhada com eletrodos óxi-rutílicos / Luciana Ferreira Silva ; orientador: Fernando Cosme Rizzo Assunção ; co-orientadores: Valter Rocha dos Santos, Sidnei Paciornik. – 2010.

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

Dissertação (mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Soldagem subaquática molhada. 3. Eletrodo revestido óxi-rutílico. 4. Adição de molibdênio. 5. Propriedades mecânicas. I. Assunção, Fernando Cosme Rizzo. II. Santos, Valter Rocha dos. III. Paciornik, Sidnei. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. V. Título.

CDD: 620.11

## Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade da realização de um dos meus sonhos. Obrigada, Senhor, por tudo.

Aos meus pais que, mesmo sem compreender plenamente o que faço me incentivaram e apoiaram integralmente nesta jornada.

Aos meus amigos acadêmicos, pela força e paciência do dia a dia. Principalmente, o pessoal do LPDI. Adoro todos vocês!

Aos meus amigos “normais”, pelo carinho, incentivo e compreensão.

Ao meu orientador Dr. Fernando Rizzo, pelos ensinamentos, conselhos e confiança.

Aos meus co-orientadores Dr. Sidnei Paciornik e Dr. Valter dos Santos, pelos ensinamentos, incentivo, paciência, puxões de orelha, sessões psicológicas, enfim, por tudo que me ensinaram. E hoje, eu posso dizer que vocês contribuíram demais para o meu crescimento pessoal e profissional. Obrigada!

A todos os membros do Departamento de Engenharia de Materiais PUC-Rio e aos técnicos dos laboratórios, pelo apoio em tudo. Vocês são ótimos!

Ao CNPq, pela ajuda financeira.

## Resumo

Silva, Luciana Ferreira; Assunção, Fernando Cosme Rizzo. **Influência do Molibdênio em Propriedades do Metal de Solda na Soldagem Molhada com Eletrodos Oxi-Rutílicos**. Rio de Janeiro, 2010. 92p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A técnica de soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos apresenta um crescente potencial de aplicação para reparos submarinos em elementos estruturais de unidades flutuantes de produção de petróleo, visto que nestes casos a soldagem é realizada em águas rasas (profundidades inferiores a 20m). Porém, ela apresenta problemas tais como o maior risco de fissuração a frio e de formação acentuada de porosidade. O presente trabalho tem como objetivo melhorar as propriedades do metal soldado com um eletrodo experimental do tipo oxi-rutílico ligado ao níquel. Estudaram-se as influências de adições de Mo no revestimento do eletrodo na microestrutura e em propriedades mecânicas. Foram testadas cinco composições de revestimentos, com teor de Mo em peso variando entre 0 e 0,4%. As soldas foram realizadas em simulador de soldagem subaquática em profundidade equivalente de 10m utilizando um sistema de soldagem por gravidade. Foram soldadas cinco juntas de topo com chanfro em V para macro e obtidas amostras para micrografia, análise química e para ensaios de tração do metal de solda, Charpy V e de dureza. As análises das micrografias mostraram que o aumento do teor de Mo diminuiu significativamente o tamanho médio de grão da região reaquecida de grãos finos, aumentando o limite de resistência à tração sem perdas de tenacidade e ductilidade. Os baixos teores de C, Mn e Si juntamente com o baixo hidrogênio difusível combateram de forma eficaz a formação de trincas de hidrogênio no metal de solda. Os resultados obtidos se constituem em dados importantes para selecionar o teor ótimo de Mo a ser empregado e mostram-se promissores quanto à possibilidade de superar vários requisitos importantes exigidos pela norma AWS D3.6M:1999 para obter a qualificação de procedimentos de soldagem na classe A.

## Palavras-chave

Soldagem subaquática molhada; eletrodo revestido óxi-rutílico; adição de molibdênio; propriedades mecânicas

## Abstract

Silva, Luciana Ferreira; Assunção, Fernando Cosme Rizzo (Advisor). **The Influence of Molybdenum on the Properties of the Weld Metal in Wet Welding with Oxi-Rutilic Electrodes**. Rio de Janeiro, 2010. 92p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The technique of underwater wet welding with coated electrodes shows an increasing potential of application in submarine repair of structural members of floating oil production units, since, in these cases, welding is performed in shallow waters (depths less than 20m). However, it presents problems such as the risk of cold cracking and the intense pores formation. The goal of the present work is to improve the properties of the weld metal with an experimental nickel alloyed oxi-rutilic electrode. The influence of Mo additions in the electrode coating on the microstructure and mechanical properties was studied. Five electrode compositions were tested, with Mo content ranging between 0 and 0.4wt%. The welds were performed in an underwater simulator at an equivalent depth of 10m, employing a gravity welding system. Five V groove joints were welded, from which samples were obtained for chemical, macro and micrographic analyses, as well as for tensile, Charpy V, and hardness tests. The micrographic analysis showed that the increase in Mo content significantly reduced the average grain size of the fine grain reheated region, increasing the strength limit without losses in toughness and ductility. The low content of C, Mn and Si, jointly with the low diffusible hydrogen values, efficiently counteracted the formation of hydrogen cracks in the weld metal. The obtained results provided relevant data to select the optimal Mo content to be employed, and open the possibility of overcoming several requirements of the AWS D3.6M:1999 standard to obtain Class A qualification of the welding procedures.

## Keywords

Underwater wet welding; oxi-rutilic coated electrode; molybdenum addition; mechanical properties

# Sumário

1	Introdução	14
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1.	Soldagem Molhada	16
2.2.	Classificação das Soldas	17
2.3.	Problemas na Soldagem Subaquática Molhada	18
2.3.1.	O Oxigênio	18
2.3.2.	O Hidrogênio	21
2.4.	Eletrodos	24
2.5.	Características do Metal de Solda	31
2.5.1.	Micro-constituintes do Metal de Solda	31
2.6.	Mecanismos de Endurecimento	33
2.6.1.	Endurecimento por Solução Sólida	33
2.6.2.	Diminuição do Tamanho de Grão	34
2.7.	A Influência do Níquel	35
2.8.	A Influência do Molibdênio	37
3	Materiais e Métodos	41
3.1.	Material	41
3.2.	Metodologia	42
3.2.1.	Métodos de Soldagem	42
3.2.2.	Preparação dos Corpos de Prova	42
3.2.3.	Caracterização Microestrutural	43
3.2.4.	Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise (MEV)	48
3.2.5.	Ensaio Mecânicos	48
3.2.6.	Análise Química	51
4	Resultados	52
4.1.	Análise Química	52

4.2. Caracterização Microestrutural do Metal de Solda por Microscopia Ótica	52
4.2.1. Avaliação das Regiões do Metal de Solda	52
4.2.2. Tamanho Médio de Grão	54
4.2.3. Análise dos Micro-Constituintes	56
4.3. Caracterização Microestrutural do Metal de Solda por Microscopia Eletrônica de Varredura	64
4.4. Propriedades Mecânicas do Metal de Solda	67
5 Análise e Discussão dos Resultados	77
6 Conclusões	85
7 Referências Bibliográficas	87
8 Anexo	76

## Lista de figuras

Figura 1: Soldagem Molhada	16
Figura 2: Esquema de uma região soldada	17
Figura 3: Diagrama de Richardson-Ellingham [4]	19
Figura 4: Diagrama de fases Fe-O [5]	19
Figura 5: Teor de Mn e O versus profundidade [6]	20
Figura 6: Kuwana e Sato [7]	20
Figura 7: Diagrama de fases Fe-H [10]	22
Figura 8: Influência da profundidade versus poros [11]	23
Figura 9: Porosidade do metal de solda em função do tipo de eletrodo, polaridade e profundidade [12]	23
Figura 10: Influência do revestimento do eletrodo no teor de hidrogênio difusível em soldas molhadas [17]	26
Figura 11: Variação da quantidade de hidrogênio difusível em função do teor de oxigênio no metal de solda [13]	27
Figura 12: Teor de hidrogênio difusível dos eletrodos comerciais [19]	29
Figura 13: Porosidade x profundidade [19]	30
Figura 14: Aspecto das superfícies das soldas realizadas a 20m de profundidade [19]	31
Figura 15: Diagrama de resfriamento contínuo idealizado para um cordão de solda de aço [9]	32
Figura 16: Efeito do endurecimento por solução sólida, causado pela adição de elementos de liga ao aço [25]	34
Figura 17: Microscopia ótica digital do metal de solda no estado como soldado, (a) sem adição de níquel e (b) com adição de 1.83%Ni [26]	35
Figura 18: Efeito do Ni na dureza do metal depositado [27]	36
Figura 19: Curvas das energias absorvidas para (a) 0.65%Mn e (b) 1.8%Mn no metal de solda [27]	36
Figura 20: Efeito do níquel na (a) dureza, (b) tenacidade e no teor de oxigênio do metal de solda [28]	37
Figura 21: Imagem da região reaquecida, (a) Com 0%Mo e	

(b) com 0.9%Mo [30]	38
Figura 22: Efeito do Mo nos metais de solda C-Mn [31]	39
Figura 23: Ensaio Charpy para valores de (a) 0.65%Mn e (b) 1.8%Mn [31]	39
Figura 24: Influência do molibdênio na microdureza no metal de solda [32]	40
Figura 25: Influência do Mo no tamanho de grão ( $\mu\text{m}$ ) no metal de solda [32]	40
Figura 26: Chapa de aço ASTM A-36	41
Figura 27: (a) Sistema de soldagem por gravidade. (b) Simulador de soldagem hiperbárica empregado nos testes de soldagem a 10m e 20m de profundidade equivalente	42
Figura 28: Microscópio AxioPlan 2 – DEMa, Laboratório de Processamento Digital de Imagens (LPDI), PUC-Rio	44
Figura 29: Mosaico (8x8) da amostra. Aumento de 50x	45
Figura 30: Imagem do mosaico do metal de solda com a grade de contagem. Aumento 500x	46
Figura 31: Imagem da parte do mosaico com 500 $\mu\text{m}$ de comprimento e suas faixas (100 $\mu\text{m}$ ) de análise	47
Figura 32: Esquema utilizado para a medição do tamanho médio de grãos finos	48
Figura 33: Máquina de ensaio de tração, Instron, modelo 5500R. ITUC, PUC-Rio	49
Figura 34: (a) Equipamento do ensaio e (b) regiões de identificações	50
Figura 35: Mosaico (9x10) da amostra D. Aumento 50X	54
Figura 36: Tamanho médio de grão versus teor de Mo	55
Figura 37: Imagem da região colunar do metal de solda (eletrodo A). Presença de FPE, FSF-A, FSF-NA e inclusões. Aumento 500X	57
Figura 38: Imagem da região de grãos grosseiros do metal solda (eletrodo A). Presença de FPE, FSF-A, FSF-NA, FP e inclusões. Aumento 500X	58
Figura 39: Imagem da região de grãos finos do metal solda (eletrodo A). Presença de FP e inclusões. Aumento 500X	58
Figura 40: Imagem da região colunar do metal solda (eletrodo B). Presença de FPE, FSF-A, FSF-NA, FA e inclusões. Aumento 500X	58
Figura 41: Imagem da região de grãos grosseiros do metal solda (eletrodo B). Presença de FPE, FSF-A, FA, e inclusões. Aumento 500X	59

Figura 42: Imagem da região de grãos finos do metal solda (eletrodo B). Presença de FP e inclusões. Aumento 500X	59
Figura 43: Imagem da região colunar do metal solda (eletrodo C). Presença de FPE, FSF-A, FSF-NA, FA e inclusões. Aumento 500X	60
Figura 44: Imagem da região de grãos grosseiros do metal solda (eletrodo C). Presença de FP, FPE, FSF-A e inclusões. Aumento 500X	60
Figura 45: Imagem da região de grãos finos do metal solda (eletrodo C). Presença de FP e inclusões. Aumento de 500X	61
Figura 46: Imagem da região colunar do metal solda (eletrodo D). Presença de FA, FSF-A, FSF-NA, FPE e inclusões. Aumento 500X	61
Figura 47: Imagem da região de grãos grosseiros do metal de solda (eletrodo D). Presença de FPE, FSF-A e inclusões. Aumento 500X	62
Figura 48: Imagem da região de grãos finos do metal de solda (eletrodo D). Presença de FA-R, FP, AFC e inclusões. Aumento 500X	62
Figura 49: Imagem da região de grãos colunares do metal de solda (eletrodo E). Presença de FPE, FSF-A, AFC e inclusões. Aumento 500X	63
Figura 50: Imagem da região de grãos grosseiros do metal de solda (eletrodo E). Presença de FP, AFC e inclusões. Aumento 500X	63
Figura 51: Imagem da região de finos do metal de solda (eletrodo E). Presença de FP, FA-R, AFC e inclusões. Aumento 500X	64
Figura 52: (a) RC, em destaque FSF-A e FPE. (b) RC com FSA-A e FA. (c) RGG com FP e FSF-A. (d) RGG com FP e AFC. (e) RC com FPE e AFC. (f) RC com AFC e inclusões. (g) AFC. (h) RC com AFC e inclusões	65
Figura 53: Matriz do metal de solda do eletrodo E. Aumento 15.000X	66
Figura 54: Agregado ferrita-carbeto do metal de solda do eletrodo E. Aumento de 30.000X	66
Figura 55: Valor médio de dureza versus teor de Mo	71
Figura 56: Teor de Mo versus energia charpy	72
Figura 57: L.E e L.R versus teor de Mo	73
Figura 58: Resultados médios de dureza HV5 (tradicional) e HB (estimado) do metal de solda	74
Figura 59: Resultados médios do L.E (MPa) tradicional e estimado do metal de solda	75

Figura 60: Resultados médios do L.R (MPa) tradicional e estimado do metal de solda	75
Figura 61: Curva tensão-deformação obtida através dos valores estimados do metal de solda	76
Figura 62: Relação entre o teor de Mo e a quantidade relativa de AFC	78
Figura 63: Relação entre a dureza e AFC	79
Figura 64: Superfície de fratura (a) do eletrodo B e (b) do eletrodo C	81
Figura 65: Superfície da fratura do metal de solda (eletrodo D). Aumento 1.500X	81
Figura 66: Relação entre o L.R e tamanho médio de grão	82
Figura 67: Relação entre o L.R e AFC	83
Figura 68: Relação entre a dureza e o L.R	84

## Lista de tabelas

Tabela 1: Influência da profundidade na composição química do metal de solda (% em peso) [19]	30
Tabela 2: Composição química do metal de solda (porcentagem em peso)	52
Tabela 3: Nomenclatura das regiões	53
Tabela 4: Fração de área das regiões (% em área)	53
Tabela 5: Tamanho médio de grão e desvio padrão na RGF	54
Tabela 6: Código e nomenclatura dos micro-constituintes	56
Tabela 7: Fração de micro-constituintes do metal de solda (porcentagem em área)	56
Tabela 8: Porcentagem em peso dos elementos na matriz ferrítica	67
Tabela 9: Porcentagem em peso dos elementos no agregado ferrita-carbeto	67
Tabela 10: Resultados dos Ensaios Mecânicos *	67
Tabela 11: Resultado do ensaio de microdureza (média de 10 indentações)	68
Tabela 12: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo A	68
Tabela 13: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo B	69
Tabela 14: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo C	69
Tabela 15: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo D	70
Tabela 16: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo E	70
Tabela 17: Resultados das propriedades mecânicas obtidas por Macroidentação Instrumentada	74
Tabela 18: Análise dos micro-constituintes do metal de solda do eletrodo A	90
Tabela 19: Análise dos micro-constituintes do metal de solda do eletrodo B	90
Tabela 20: Análise dos micro-constituintes do metal de solda do eletrodo C	91
Tabela 21: Análise dos micro-constituintes do metal de solda do eletrodo D	91
Tabela 22: Análise dos micro-constituintes do metal de solda do eletrodo E	91
Tabela 23: Resultados dos valores dos ensaios de dureza (HV5) do metal de solda	92
Tabela 24: Resultados dos ensaios Charpy (0 °C) do metal de solda	92