



Ana Paula Beck Leão

**Metais de Solda Ligados ao Ni com Adições de
Cu e Mo 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 dos Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Orientador: Prof^a Ivani de Souza Bott

Co-Orientador: Dr. Valter Rocha dos Santos

Rio de Janeiro
Setembro de 2009



Ana Paula Beck Leão

**Metais de Solda Ligados ao Ni com Adições de
Cu e Mo para Soldagem Subaquática Molhada**

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

Prof^a. Ivani de Souza Bott

Orientador

Departamento de Engenharia dos Materiais–PUC-Rio

Dr. Valter Rocha dos Santos

Co-Orientador

Departamento de Engenharia dos Materiais –PUC-Rio

Dr. Alexandre Meirelles Pope

Consultor Autônomo

Prof. Ezequiel Caires Pereira Pessoa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais–
IFET/MG

Dr. Giovanni Dalpiaz

CENPES PETROBRAS

Prof. José Eugênio Leal

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

Rio de Janeiro, 04 de setembro de 2009

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

Ana Paula Beck Leão

Graduou-se em Engenharia de Materiais na Universidade Federal do Rio Grande do Sul em agosto de 2005. Foi aluna de iniciação científica e bolsista do CNPq nos anos de 2001 a 2004 pelo Departamento de Materiais da UFRGS.

Ficha Catalográfica

Leão, Ana Paula Beck

Metais de solda ligados ao Ni com adições de Cu e Mo para soldagem subaquática molhada / Ana Paula Beck Leão ; orientador: Ivani de Souza Bott ; co-orientador: Valter Rocha dos Santos. – 2009.

102 f. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia de Materiais e Metalurgia – Teses.
2. Soldagem subaquática. 3. Eletrodos revestidos. 4. Caracterização microestrutural. 5. Adições de Cu e Mo. I. Bott, Ivani de Souza. II. Santos, Valter Rocha dos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

Entrega o teu caminho ao Senhor,
confia nele, e o mais Ele fará.
(Salmo 37.5)

Ao meu marido pelo incentivo à minha vida profissional, pelo amor, amizade e carinho durante todos estes anos.
À minha tia Nívea (in memoriam) pela confiança depositada em mim, por sua amizade e carinho.

Agradecimentos

A Deus por ter me abençoado muito durante toda a vida e por ser sempre o guia das minhas decisões.

Ao meu marido e minha filha a quem tanto amo, pelo carinho, compreensão e amizade em todos os momentos.

À minha orientadora, professora Ivani de S. Bott, pela oportunidade, incentivo, orientação e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Dr. Valter Rocha dos Santos, pelos ensinamentos, apoio e orientação ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

À PUC-Rio e à UFMG, pelo auxílio concedido ao trabalho.

Ao meu colega e amigo, Engenheiro Rafael Araújo, pelo apoio e companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Marcos Henrique pela ajuda na análise microestrutural.

Ao técnico Heitor Guimarães pela colaboração nas atividades realizadas no laboratório de metalografia.

A todos os professores do DEMA, pelos ensinamentos.

Aos meus pais, pela educação, amor e carinho que me deram durante toda minha vida.

Aos meus familiares e amigos por me apoiarem e me incentivarem na realização deste trabalho.

Ao IBQN, em especial ao Dr. André Costa e Silva e ao Engenheiro Raul T. Nicolescu, pela compreensão na finalização desta dissertação.

Resumo

Leão, Ana Paula Beck; Bott, Ivani de Souza. **Metais de Solda Ligados ao Ni com Adições de Cu e Mo para Soldagem Subaquática Molhada.** Rio de Janeiro, 2009. 102p. Dissertação de Mestrado - Departamento Engenharia dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos metais de solda produzidos por eletrodos oxidantes com níquel, juntamente com adições de cobre e de molibdênio, através do refino de grão ou do endurecimento por solução sólida. Os eletrodos oxidantes se caracterizam por apresentar menores teores de hidrogênio difusível quando comparado aos eletrodos rútilicos. Entretanto o metal de solda depositado com este tipo de eletrodo possui propriedades mecânicas inferiores aos eletrodos rútilicos, já que elementos de liga importantes, como Mn e Si, são perdidos por oxidação. Com a intenção de contornar esta situação procurou-se adicionar elementos de liga que não sejam significativamente afetados pelo caráter oxidante do revestimento, como Cu ou Mo. Foram preparados dois corpos de prova para soldagem, nos quais foram usinados furos espaçados e um rasgo para adição de ambos elementos, Cu e Mo. As diferentes porcentagens destes elementos foram medidas através da microanálise por Espectroscopia de Energia Dispersiva. A partir desses resultados foi realizada análise microestrutural utilizando a Microscopia Ótica, medidas do tamanho de grão, além do ensaio de microdureza para avaliar a influência de cada elemento no metal de solda. Os resultados mostraram que o molibdênio teve uma forte influência na microdureza do metal de solda quando comparado ao cobre. Em relação ao tamanho de grão, eles apresentaram influências opostas, a adição de maiores teores Mo acarretou uma diminuição do tamanho de grão e a com a adição do Cu ocorreu um pequeno aumento do grão até tornar-se constante.

Palavras-chave

Soldagem Subaquática; Eletrodos Revestidos; Caracterização Microestrutural; Adições de Cu e Mo

Abstract

Leão, Ana Paula Beck; Bott, Ivani de Souza (Advisor). **Ni Alloyed Weld Metals with Additions of Cu and Mo for Underwater Wet Welding**. Rio de Janeiro, 2009. 102p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work was carried out to improve the mechanical properties of weld metals deposited by nickel oxidizing electrodes, together with additions of copper and molybdenum, through the grain refinement or by solid solution hardening. The oxidizing electrodes are characterized by the lower levels of diffusible hydrogen and, hence, by the lesser possibility of cold crack formation when compared to rutile electrodes. However, the weld metal deposited with this type of electrode shows mechanical properties below that obtained by rutile electrodes, as long as important alloy elements, such as Mn and Si, are lost by oxidation. In order to avoid this situation and obtain weld metals with better mechanical properties it was added alloy elements that are not significantly affected by the oxidant character of the coating, such as Cu and Mo. Two test specimens were prepared for welding, where spaced holes and a notch were machined in each one for the addition of both elements, Cu and Mo. Different percentages of these elements were measured by Energy Dispersive Spectroscopy microanalysis. From these results it was performed microstructural analysis using optical microscopy, grain size measurements and microhardness tests to evaluate the influence of each element in the weld metal and compare them to each other. The results showed that molybdenum has a stronger influence on the microhardness of the weld metal than copper. Regarding the grain size it was noted an opposite influence of the elements, where the addition of Mo caused a decrease of the grain size and the addition of Cu caused a slightly increase, until the grain size becomes constant.

Keywords

Underwater Welding; Shielded Electrodes; Microstructural Characterization; Cu and Mo additions.

Sumário

1	Introdução	18
2	Revisão Bibliográfica	20
2.1	Soldagem Subaquática Molhada	20
2.2	Problemas Ocasionados pela Soldagem Molhada	21
2.2.1	Fissuração pelo Hidrogênio (Trinca Induzida pelo Hidrogênio)	24
2.2.2	Trincas de Solidificação (Trincamento a Quente)	26
2.3	Tipos de Eletrodos Utilizados na Soldagem Molhada	28
2.4	Influência da Microestrutura na Tenacidade	32
2.5	Mecanismo de Aumento de Resistência Mecânica	36
2.6	Influência dos Elementos de Liga nos Aços	37
2.6.1	Influência do Níquel	39
2.6.2	Influência do Molibdênio	42
2.6.3	Influência do Cobre	48
3	Materiais e Métodos	54
3.1	Materiais	54
3.2	Metodologia	55
3.2.1	Procedimento de Soldagem	55
3.2.2	Produção dos Corpos de Prova	56
3.2.3	Ensaio Metalográfico	58
3.2.4	Mapeamento da Amostra	59
3.2.5	Ensaio de Microdureza	60
3.2.6	Análise Quantitativa por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	61
3.2.7	Análise por Microscopia Ótica (MO)	63
3.2.8	Medição do Tamanho de Grão	63
4	Resultados	64
4.1	Produção dos CPs-Região de Análise de Cu e Mo	64

4.2	Análise por EDS	65
4.3	Ensaio de Microdureza na Região de Grãos Finos	71
4.4	Tamanho de Grão na Região de Grãos Finos	75
4.5	Análise Microestrutural	79
4.5.1	Análise Microestrutural da Região de Grãos Finos	79
4.5.2	Análise Microestrutural da Região Colunar	82
5	Discussão dos Resultados	89
5.1	Produção dos Corpos de prova	89
5.2	Influência da Adição de Cu e Mo na Região de Grãos Finos	90
5.3	Microestrutura da Zona Colunar	93
6	Conclusões	95
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	96
7	Referências Bibliográficas	97
8	Apêndice	100
8.1	Resultados das Amostras com Adição de Cobre e Molibdênio	100

Lista de figuras

Figura 1-a) Soldagem hiperbárica e b) Soldagem molhada [5].	21
Figura 2-Variação da quantidade de oxigênio e manganês no metal de solda com aumento da profundidade [7].	22
Figura 3- Diagrama de equilíbrio Ferro-Oxigênio (Van Vlack 1977) [7].	23
Figura 4-Solubilidade do hidrogênio no ferro e em aços baixa ligas [14].	25
Figura 5-Esquema ilustrando a formação de filmes líquidos entre grãos e a ocorrência de trincas de solidificação, Rebello [10].	27
Figura 6-Esquema ilustrando a formação de trincas de solidificação longitudinal ao cordão, Rebello [10].	27
Figura 7-Influência dos tipos de revestimentos dos eletrodos sobre os teores de hidrogênio nos metais de solda depositados em contato com o meio aquoso [16].	29
Figura 8-Diagrama de Ellingham-Richardson [7].	31
Figura 9- Micrografia mostrando a microestrutura típica de aços baixo C: A- Ferrita de Contorno de grão; B- Ferrita Poligonal; C- Ferrita de Widmanstatten; D- Ferrita Acicular [13].	33
Figura 10-Esquema mostrando os efeitos da adição de elementos de liga, tempo de resfriamento, quantidade de oxigênio e tamanho de grão austenítico [13].	34
Figura 11-Valores de tenacidade em função da fração de volume da ferrita acicular obtida em soldas realizadas por arco submerso [13].	35
Figura 12-Trinca propagando pela ferrita de segunda fase (FS(A)), imobilizada pela ferrita acicular [10].	35
Figura 13-Tipos de diagramas de equilíbrio para o sistema ferro-elemento de liga [14].	38
Figura 14-Efeito do endurecimento por solução sólida, causado pela adição de elementos de liga ao aço [14].	39
Figura 15-Microscopia ótica do metal de solda, ataque nital 2% a) sem adição de Ni, b) Adição de 1,83% Ni [25].	40

Figura 16-Efeito do níquel na energia absorvida a 0°C através de ensaio Charpy-V e sobre o oxigênio no metal de solda [6].	41
Figura 17-Efeito do níquel sobre a dureza e tensão de ruptura do metal de solda [6].	41
Figura 18-Efeito do Mo em metais de solda C-Mn [28].	43
Figura 19-Resultados do teste Charpy para 0,65%Mn e 1,8%Mn [28].	44
Figura 20-Resultados de testes de Impacto Charpy para condições sem tratamento térmico com teores de 1,5%Mn [29].	44
Figura 21-Resultados da energia de impacto em diferentes temperaturas [30].	47
Figura 22-Varição da microdureza ao longo do cordão de solda [33]. a-como soldado (AW); b-com alívio de tensões (SR).	49
Figura 23-Efeito do teor de Cu no limite de elasticidade (YS) e no limite de resistência à tração (U.T.S) [33].	49
Figura 24-Resultados de ensaio Charpy. a-como soldado, b-com alívio de tensões [33]	50
Figura 25-Fotomicrografias da microestrutura como soldada com dois teores de Cu, 0,02 e 1,4%. Zona colunar: a e b; Região de grãos grosseiros (RGG): c e d; Região de grãos finos (RGF): e e f [33].	51
Figura 26-Equipamento utilizado para simulação da soldagem molhada.	56
Figura 27-Desenho esquemático do corpo de prova utilizado para soldagem molhada, dimensões em mm.	57
Figura 28-Vista lateral do corpo de prova, dimensões em mm.	57
Figura 29-Gradiente de distribuição do Cu ou Mo.	58
Figura 30-Corte realizado no corpo de prova após soldagem.	58
Figura 31- Traçador de altura com escala ajustável.	59
Figura 32-Representação do mapeamento da amostra.	60
Figura 33-Imagem da amostra de Cu (a) e Mo (b), em escala 1:1.	60
Figura 34-Análise realizada por MEV/EDS.	62
Figura 35-Exemplo de código final adotado para um ponto da amostra.	62
Figura 36-Superfície analisada para amostra com adição de cobre.	64

Figura 37-Superfície analisada para amostra com adição de molibdênio.	65
Figura 38- Gráfico mostrando a variação do teor de Ni em relação às diferentes porcentagens de Cu obtidas.	67
Figura 39- Gráfico mostrando a variação do teor de Ni em relação às diferentes porcentagens de Mo obtidas.	67
Figura 40-Mapeamento dos pontos utilizados para análise da amostra com adição de Cu.	69
Figura 41-Mapeamento dos pontos utilizados para análise da amostra com adição de Mo.	70
Figura 42-Gráfico mostrando a relação da microdureza na região de grãos finos com porcentagem de cobre para teores menores ou iguais a 1%.	74
Figura 43-Gráfico mostrando a relação da microdureza na região de grãos finos com porcentagem de molibdênio para teores até 1%.	74
Figura 44-Gráfico mostrando a relação da microdureza na região de grãos finos com porcentagem de cobre para teores maiores do que 1%.	75
Figura 45- Gráfico mostrando a relação entre a quantidade de cobre (para teores menores ou iguais a 1%) e o tamanho de grão na RGF.	77
Figura 46- Gráfico mostrando a relação entre a quantidade de molibdênio e o tamanho de grão na RGF.	78
Figura 47-Gráfico mostrando a relação entre a quantidade de cobre (para teores >1) e o tamanho de grão na RGF.	78
Figura 48-Microestruturas das regiões de grãos finos da amostra com adição de cobre, para teores de cobre até 1%. Aumento 500X.	80
Figura 49- Microestruturas das regiões de grãos finos da amostra com adição de cobre, para teores de cobre acima de 1%. Aumento 500X.	81
Figura 50-Microestruturas das regiões de grãos finos da amostra com adição de molibdênio, para teores de molibdênio até 1%. Aumento 500X.	82

Figura 51-Microestrutura do metal de solda da amostra com adição de cobre apresentando diferentes morfologias da ferrita como, por exemplo, PF(G), PF(I) e FS(A). Aumento de 500X.	83
Figura 52-Microestrutura do metal de solda da amostra com adição de cobre apresentando diferentes morfologias da ferrita como, por exemplo, PF(G), AF e FS(A). Aumento de 500X.	84
Figura 53-Microestrutura do metal de solda da amostra com adição de molibdênio apresentando diferentes morfologias da ferrita como, por exemplo, PF(I), AF e FS(N). Aumento de 500X.	84
Figura 54-Microestrutura do metal de solda da amostra com adição de molibdênio apresentando diferentes morfologias da ferrita como, por exemplo, PF(I), FS(A) e FS(N). Aumento de 500X.	85
Figura 55-Gráfico mostrando a relação entre a porcentagem de cobre e a largura dos grãos colunares para amostra com adição de cobre.	86
Figura 56- Gráfico mostrando a relação entre a porcentagem de molibdênio e a largura dos grãos colunares para amostra com adição de molibdênio.	87
Figura 57-Microestrutura da região colunar da amostra com adição de cobre com teores de 0,31 e 0,81%Cu. Aumento 500X.	87
Figura 58- Microestrutura da região colunar da amostra com adição de molibdênio com teores de 0,25 e 0,6%Mo. Aumento 500X.	88
Figura 59-Gráfico de comparação dos resultados de microdureza para as amostras com adição de cobre e molibdênio na região de grãos finos.	91
Figura 60-Gráfico de comparação dos resultados de tamanho de grão para as amostras com adição de cobre e molibdênio na região de grãos finos.	93

Lista de tabelas

Tabela 1-Resultado do ciclo térmico, Nóbrega [3]. Eletrodo 19: Tipo oxidante.	24
Tabela 2-Composição química dos eletrodos usados para o teste [7].	30
Tabela 3-Classificação do metal de solda de aços ferríticos observados ao microscópio ótico, segundo o IIW [17].	32
Tabela 4-Teores de Ni e Mo adicionados no metal de solda [30]. SLW: Metal de solda sem adição de Ni e Mo.	45
Tabela 5-Resultados de microdureza [30]	46
Tabela 6-Porcentagem microestrutural no metal de solda [30].	48
Tabela 7-Resumo de alguns trabalhos mostrando a influência do Cu no metal de solda [31].	53
Tabela 8-Composição química do metal de base.	55
Tabela 9-Resultado da análise por EDS para alguns pontos da amostra com adição de cobre.	65
Tabela 10-Resultados da análise por EDS para alguns pontos da amostra com adição de molibdênio.	66
Tabela 11-Resultados de microdureza na região de grãos finos obtidos da amostra com adição de cobre.	72
Tabela 12-Resultados de microdureza na região de grãos finos obtidos da amostra com adição de molibdênio.	73
Tabela 13-Resultados da média do tamanho de grão na região de grãos finos em relação às diferentes porcentagens de cobre.	76
Tabela 14- Resultados da média do tamanho de grão na região de grãos finos em relação às diferentes porcentagens de molibdênio.	77
Tabela 15-Quantificação da região colunar (RC), região de grãos grosseiros (RGG) e região de grãos finos (RGF) para amostras com adição de a) Cu e b) Mo.	79
Tabela 16-Resultados de microdureza e da média da largura do grão colunar em relação ao teor de cobre.	86

Tabela 17- Resultados de microdureza e da média da largura do grão colunar em relação ao teor de molibdênio.	86
Tabela 18-Resultados da amostra com adição de cobre.	101
Tabela 19-Resultados da amostra com adição de molibdênio.	102