

5 Discussão dos Resultados

Este trabalho foi desenvolvido objetivando obter metal de solda para aplicação subaquática. As soldagens foram realizadas com eletrodo revestido contendo 2%Ni e com a adição de diferentes porcentagens de Cu e Mo. A microestrutura do metal de solda molhada, segundo apontado em muitos trabalhos [1, 6, 8,16 e 35] apresenta grande fração da região de grão finos, sendo esta região, a principal responsável pelas propriedades mecânicas. Procurou-se, dessa maneira, dar especial atenção a esta região do metal de solda.

5.1 Produção dos Corpos de prova

A técnica desenvolvida para obtenção dos resultados mostrou-se eficiente uma vez que foi possível conseguir uma correlação entre dureza, microestrutura e porcentagens dos elementos de maneira pontual. O processo utilizado para adição de cobre e molibdênio também obteve êxito já que foram obtidos pontos com diferentes porcentagens dos elementos sem a necessidade de fabricação de eletrodos com cada teor. No entanto, como pode ser observado na figura 39, para a amostra de molibdênio, foi preciso à seleção dos pontos de maneira a satisfazer as condições necessárias ao objetivo do trabalho, ou seja, diferentes porcentagens de Mo e teor de Ni próximo a 2%. Devido a isto, os pontos analisados referentes à amostra com adição de Mo apresentaram teores menores ou iguais a 1,1%Mo.

O fato da amostra com adição de Mo ter apresentado esta distribuição irregular, diferentemente da amostra com adição de Cu, pode estar associada a uma série de fatores. Para um mesmo volume de material, por exemplo, a quantidade de molibdênio era menor que a quantidade de Cu, já que o cobre foi depositado com 99% de pureza e o molibdênio com 60%. O fator difusividade dos dois elementos também pode ter contribuído para esta diferença na distribuição obtida. Entretanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado

para perfeita compreensão dos mecanismos envolvidos e sua discussão não é o escopo deste trabalho.

5.2

Influência da Adição de Cu e Mo na Região de Grãos Finos

Os valores de microdureza apresentados pela amostra com adição de cobre com teores menores ou iguais a 1% (figura 42) mostraram que a adição de cobre não foi eficaz para aumentar a dureza em relação a soldas realizadas apenas com adição de níquel. A média de microdureza obtida para amostra sem adição de Cu ou Mo, ou seja, apenas com 2%Ni, foi de 160HV e este resultado mostrou-se semelhante aos resultados do trabalho apresentado por Pope et al [6]. Embora alguns trabalhos [31,33] indiquem um aumento da dureza por solução sólida com adições de cobre nessa faixa em soldas realizadas em ambiente atmosférico; na solda subaquática realizada neste trabalho não foi verificado aumento de dureza. Isto pode ser explicado com base na figura 45, a qual mostra a relação das porcentagens de cobre para teores menores ou iguais a 1%Cu em função do tamanho de grão medido na região de grãos finos. Esta figura demonstra que o aumento do teor de cobre até 1% ocasionou um aumento do tamanho de grão de 3,86 μ m com 0,36%Cu para 5,5 μ m com 0,8%Cu. Dessa maneira, mesmo que adições de cobre até 1% tenham formado solução sólida, este mecanismo não foi suficiente para aumentar a dureza, já que simultaneamente ocorreu um aumento do tamanho de grão, o que ocasiona redução das propriedades mecânicas.

No que se refere aos resultados de microdureza para teores de Cu acima de 1% (figura 44), entretanto, ocorreu um aumento na dureza, em torno de 20-30 HV comparado à amostra sem adição de cobre. Este aumento da dureza pode ter sido ocasionado devido à precipitação de cobre, pois, segundo Costa e Silva [13], ligas de ferro com mais de 1,5%Cu apresentam endurecimento por precipitação. O cobre apresenta uma solubilidade máxima na ferrita a altas temperaturas de aproximadamente 2% a 835°C e a 590°C sua solubilidade é menor que 0,3%. Dessa maneira, o cobre dissolvido na ferrita é rejeitado, precipitando à medida que a temperatura diminui. Segundo o trabalho apresentado por Es-Souni [33], os quais investigaram a influência do cobre com teores na faixa de 0,02 a 1,4% na microestrutura e dureza de soldas realizadas com eletrodo revestido do tipo ferrítico baixo hidrogênio, foi encontrada extensa precipitação de ϵ -Cu em amostras com teores de 1,4%Cu. Ainda de acordo com Easterling [36], este tipo de precipitação durante a solidificação é possível

ocorrer e de ser explicado através de solutos que estendam a faixa de solidificação ou que possuam baixo coeficiente de partição, como é o caso do cobre. Estes irão se acumular na frente de solidificação, interface sólido-líquido levando a um enriquecimento por soluto de modo a exceder o limite de solubilidade do Cu no Fe- γ , ocasionando a precipitação. Desta maneira, é possível que o aumento da dureza para teores de cobre acima de 1% tenha sido ocasionado por precipitados de ϵ -Cu na matriz ferrítica, no entanto, há necessidade de avaliação por microscopia eletrônica de transmissão (MET).

Para os resultados das medidas de tamanho de grão da amostra com adição de Cu acima de 1%, mostrados na figura 47, foi possível observar que não houve mudança no tamanho de grão, permanecendo este próximo a 5 μ m.

Em relação à dureza da amostra com adição de molibdênio, os resultados, mostrados na tabela 12 e figura 43, mostram que pequenas quantidades de molibdênio (0,35%) já foram suficientes para causar um considerável aumento da dureza (\approx 25HV) em relação à amostra sem molibdênio. Esta tendência aumenta para maiores teores de Mo. A maior dureza obtida foi de 210HV com 1,02%Mo. A figura 59 mostra uma comparação do endurecimento causado na amostra com adição de Mo em relação à amostra de Cu com todas as porcentagens utilizadas neste trabalho.

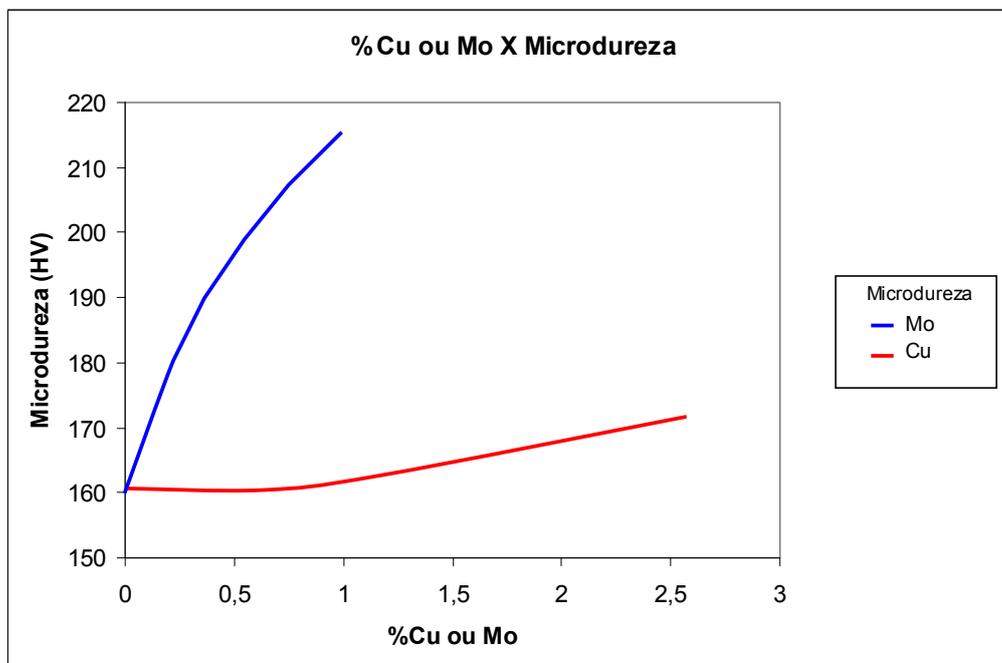


Figura 59-Gráfico de comparação dos resultados de microdureza para as amostras com adição de cobre e molibdênio na região de grãos finos.

Por meio deste gráfico (figura 59) é possível observar claramente que o molibdênio é um elemento de liga mais eficiente do que o cobre no que se refere ao endurecimento desta liga. Alguns trabalhos de soldas atmosféricas [28 e 29] citam este eficiente efeito endurecedor do elemento molibdênio, onde dois fatores parecem contribuir para este endurecimento: o efeito causado pela formação da solução sólida e aquele causado pela precipitação de carbonetos. A contribuição via solução sólida depende da diferença de raios atômicos do soluto em relação ao solvente. E quanto maior esta diferença maior o efeito de aumento de resistência e endurecimento devido ao mecanismo de solução sólida substitucional, de acordo com a regra de Hume-Rothery. Além deste mecanismo, o molibdênio possui forte tendência em formar carbonetos, os quais aumentam consideravelmente a dureza. Entretanto, considerando o tipo de eletrodo, ou seja, do tipo oxidante, utilizado neste trabalho, o mecanismo de endurecimento por solução sólida é provavelmente, entre os dois citados, aquele que mais contribuiu para o aumento da dureza, já que em soldas subaquáticas realizadas com eletrodo oxidante costumam apresentar muito pouco carbono no metal de solda e, dessa maneira, tendem a formar poucos carbonetos. Outro mecanismo bastante eficiente no aumento da dureza e melhora das propriedades mecânicas é o refino dos grãos.

Ao se observar os resultados das medidas do tamanho de grão em relação aos teores de molibdênio (Figura 46) é possível concluir que o aumento deste elemento foi eficiente para reduzir o tamanho de grão, contribuindo, dessa forma, para o aumento da dureza. Com 0,2%Mo o tamanho de grão obtido foi de 5,99 μm e para teores de 0,85%Mo foi obtido um TG=3,91 μm . Esta redução no tamanho de grão com maiores teores de molibdênio foi também descrito no trabalho apresentado por Surian [29], o qual analisou a influencia do Mo numa faixa de 0-0,9%Mo para metais de solda realizados com eletrodo ferrítico baixo hidrogênio e com C (0,05%), Ni (1,8%), Mn (1 e 1,5%). Diante disso, pode-se concluir que o aumento da dureza ocasionado por maiores teores de Mo foi atribuído não apenas à formação de solução sólida, mas também ao refino da microestrutura. Esta relação entre o tamanho de grão e o aumento da resistência está representada pela equação de Hall-Petch (equação 2).

Este resultado de refino de grão pode trazer benefícios para o metal de solda, pois além de ser responsáveis pelo aumento da dureza, é também benéfico no que diz respeito à tenacidade. A figura 60 mostra uma comparação do tamanho de grão obtido na amostra com Mo em relação à amostra de Cu para todas as porcentagens destes elementos. Pode ser visto por meio dela

(figura 60) a constante diminuição do TG para amostra com adição de Mo até alcançar valores da ordem de $3\mu\text{m}$. Embora não tenha ocorrido diminuição do TG para amostra com adição de Cu, também foram encontrados tamanhos de grão da ordem de $3\mu\text{m}$, quando adicionados teores de Cu na faixa de 0,3%. De acordo com esta a figura o aumento do teor de ambos os elementos (Cu e Mo) agem de maneira opostas no tamanho de grão e ainda, há uma faixa (da ordem de 0,65%) em que eles apresentam medidas de TG similares.

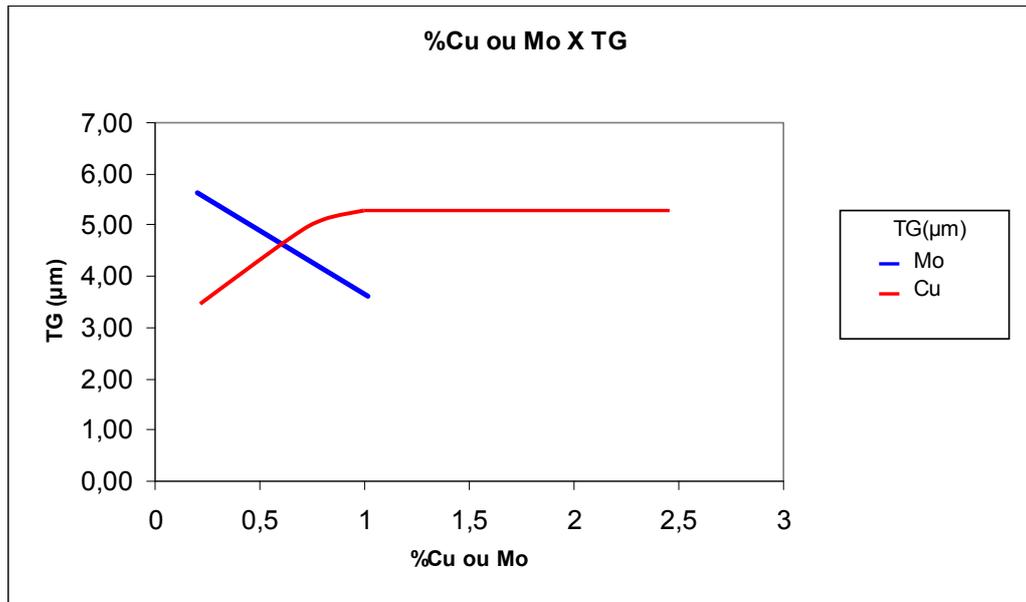


Figura 60-Gráfico de comparação dos resultados de tamanho de grão para as amostras com adição de cobre e molibdênio na região de grãos finos.

Muito embora o aumento do teor de molibdênio tenha se mostrado eficaz no aumento da dureza e diminuição do tamanho de grão, sabe-se através de pesquisa realizada [37] que teores deste elemento acima de 0,4% em soldas molhadas com eletrodo do tipo oxidante com 2%Ni, são responsáveis pela formação de trincas, prejudicando, desta forma, as propriedades mecânicas da solda.

5.3 Microestrutura da Zona Colunar

Por meio da tabela 15, que apresenta os resultados da quantificação das três diferentes regiões do metal de solda (região colunar (RC), região de grãos finos (RGF) e região de grãos grosseiros (RGG)), foi possível confirmar a maior quantidade de RGF encontradas em soldas realizadas em baixo d'água. A RGG por apresentar pequena porcentagem comparada às outras duas regiões não foi

analisada neste trabalho. A região colunar apresentou uma porcentagem considerável do total de regiões encontradas no metal de solda. Muito embora, reconhece-se o fato de que a microestrutura da zona colunar de eletrodos do tipo oxidante apresentar nenhuma ou muito pouca ferrita acicular (AF), que seria a principal responsável pela melhora nas propriedades mecânicas desta região [13,20 e 35]. Segundo o trabalho de Bracarense et al [35], em soldas subaquática foram medidos 1% AF no metal de solda realizado com eletrodo do tipo oxidante contra 40% AF para aqueles realizado com eletrodos do tipo rutilico. Isso ocorre porque no caso de soldas molhadas depositadas com eletrodos oxidantes a perda de elementos de liga, como C, Mn e Si com a profundidade prejudica a formação de microestruturas de baixa temperatura. Desta forma, para soldas deste tipo, esta região possui pouca influência no que se refere à melhora das propriedades mecânicas

Neste trabalho, foi observado na região colunar a presença de ferrita primária de contorno de grão PF(G) e intragranular PF(G), ferrita de segunda fase alinhada FS(A) , e alguma ferrita acicular, como mostrado nas figuras 51, 52, 53 e 54. Estas microestruturas estão de acordo com as microestruturas encontradas em muitos trabalhos de soldagem de aço C-Mn com adição destes elementos Ni, Mo e Cu.

Em relação às medidas da largura da zona colunar foi possível observar que o aumento dos teores tanto do cobre como do molibdênio contribuiu para a diminuição da largura dos grãos colunares (Figuras 55 e 56). A principal explicação para este fato seria a precipitação destes elementos (Cu e Mo). Este fato é descrito em muitos trabalhos que adicionam elementos de liga [28,29 e 33]. Quanto aos resultados de microdureza da zona colunar de ambas as amostras apresentadas nas tabelas 15 e 16, embora não se tenham muitos resultados, pode-se perceber que a dureza apresentada foi superior ao da região de grãos finos para as duas amostras e, para a amostra de Mo, observa-se um aumento significativo de 185HV, com 0,2%Mo para 228HV, com 1,2%Mo, indicando a provável influência dos carbonetos.