

5 Análise e Discussão dos Resultados

Pela análise dos resultados de composição química do metal de solda apresentados na Tabela 2 constata-se que os eletrodos testados no presente trabalho comportam-se como eletrodos do tipo oxidante. Isto está evidenciado pelos baixos teores de Mn e Si obtidos. Estes elementos são desoxidantes e, portanto reagem com o oxigênio formando óxidos como SiO_2 e MnO que são retirados na forma de escória e participam da composição das inclusões [13]. Coerentemente o teor de oxigênio do metal de solda é elevado (tipicamente 0.268% para o eletrodo A) e o teor de carbono é bem inferior ao comumente observado nos metais de solda de aços ferríticos. Isto justifica a grande quantidade de inclusões não-metálicas presentes no metal de solda de todas as amostras. Como consequência, a microestrutura é pobre em ferrita acicular. Assim, o refino de grão surge como um dos mais eficazes mecanismos de aumento de resistência aplicáveis neste tipo de eletrodo.

As análises realizadas por microscopia ótica das regiões presentes no metal de solda mostram que a maior parte do metal de solda (da ordem de 75% a 80%), para todos os eletrodos, é formada pela região de grãos finos (RGF). Tanto a região colunar quanto a região reaquecida de grãos grosseiros apresentaram frações de área bem pequenas. Isto evidencia que na RGF, devem ser concentrados os maiores esforços para melhorar as propriedades mecânicas do metal de solda.

Na caracterização microestrutural notou-se que o tamanho médio de grão foi reduzido com a adição de molibdênio como mostra a Figura 36. Este resultado condiz com os resultados de Leão A.P.B [32], onde foi concluído que o tamanho de grão médio na RGF de soldas molhadas diminui com o aumento do teor de Mo. A Figura 36 mostra claramente que a adição de 0.099% de Mo (eletrodo B) diminui consideravelmente o tamanho médio de grão. Após esta queda o tamanho de grão permanece praticamente constante para os crescentes teores de Mo.

As análises microestruturais mostram que o percentual de FSF-A, FSF-NA e FA, localizados na região colunar e na região de grãos grosseiros, são baixos mesmo contendo em sua composição química os elementos Mo e Ni, que são ativadores da formação destes micro-constituintes. Este pequeno percentual se justifica pelo fato do metal de solda conter baixo teor de carbono.

Como consequência benéfica da adição de Mo obteve-se ainda a formação de ferrita acicular na região reaquescida (FA-R). Os resultados apresentados na Tabela 7 mostram que pequenas adições de Mo (eletrodo B) aumentam consideravelmente a quantidade deste constituinte. Sua morfologia assemelha-se com a ferrita acicular encontrada na região colunar e na região de grãos grosseiros.

O baixo teor de carbono presente no metal de solda leva à formação de FP. Pode-se observar este fato analisando a tabela 4 onde mostra que quase todo o metal de solda é formado por FP, sendo esta a microestrutura predominante na região reaquescida de grãos finos de todas as amostras.

Os resultados das análises de fração de área dos AFC mostraram que os valores dos AFC aumentam com o aumento do teor de Mo no metal de solda coerentemente com a tendência à formação de carbetos, característica do Mo. A Figura 62 mostra a influência do Mo sobre a formação de AFC.

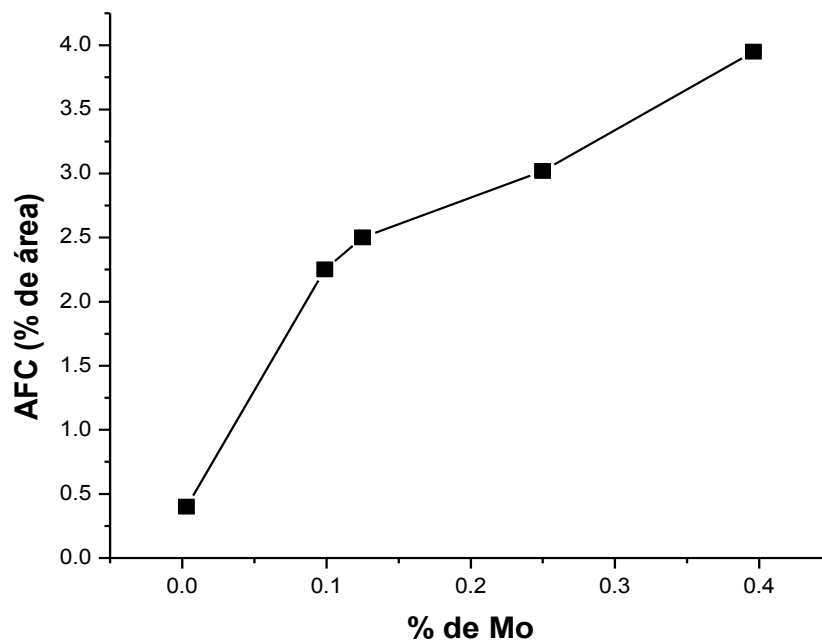


Figura 62: Relação entre o teor de Mo e a quantidade relativa de AFC

Os valores encontrados de AFC combinados com o refino de grãos podem influenciar nas propriedades mecânicas do metal de solda. Os valores de dureza apresentados pelas amostras que contém molibdênio mostraram que a adição deste elemento aumenta a dureza do metal de solda. Em trabalhos de soldagem atmosférica foi verificado que o efeito endurecedor do Mo pode ser manifestado em três diferentes maneiras, sendo por solução sólida, refino de grão e pela forma de carbeto [34]. A Figura 63 mostra o aumento da fração de área dos AFC juntamente com o aumento da dureza do metal de solda.

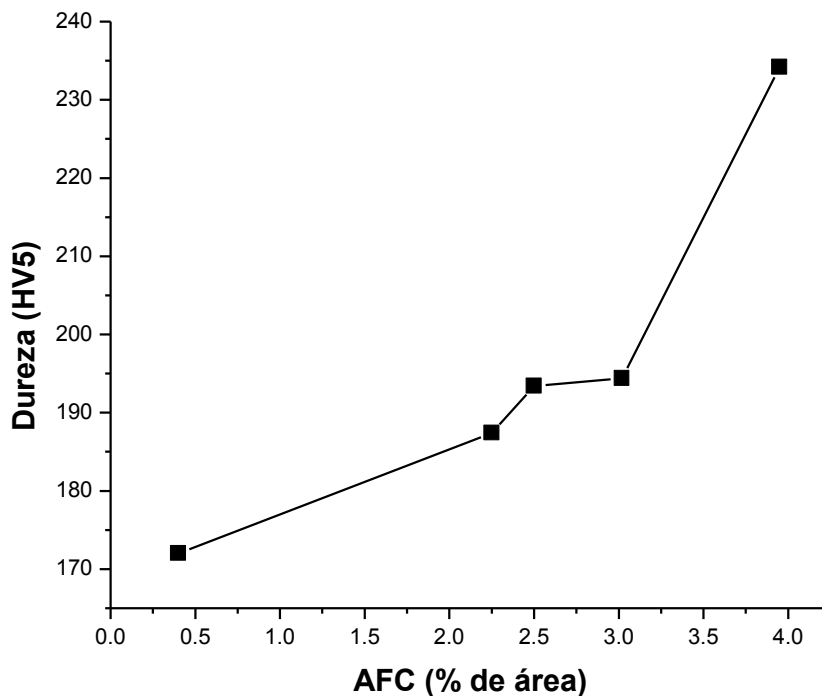


Figura 63: Relação entre a dureza e de percentual AFC

Os resultados de microdureza nas soldas produzidas pelos eletrodos B, C e D foram relacionados com os micro-constituintes e suas devidas regiões do metal de solda. Em todos os eletrodos, observou-se que os maiores valores de microdureza foram obtidos na RGF, compostas pelos micro-constituintes FP, FA-R e AFC. Os micro-constituintes FA-R e AFC presentes do metal de solda assim como o refino dos grãos se dão devido à presença do Mo, como já foi apresentado nos resultados anteriores. Com exceção da FP, estes micro-constituintes possuem a característica de aumentar a dureza do metal de solda, assim justificando os altos

valores obtidos pelo ensaio. A RGF analisada possui grãos extremamente finos, que também têm a característica de endurecer o metal depositado, além de promover tenacidade.

O aumento da dureza pela a adição de molibdênio e cobre em soldas molhadas foi relatado por Leão A.P.B [32], onde o Mo apresentou resultados satisfatórios e o Cu não mostrou influência significativa no aumento da dureza do metal de solda.

A justificativa para a o bom valor de tenacidade do metal de solda é dada pela microestrutura de FP e o tamanho bem pequeno destes grãos localizados na região reaquecida de grãos finos, como pode ser visto pelo eletrodo C que contém a maior fração de RGF (81.3% de área) e que também apresentou o maior valor de energia charpy, 54J. A pouca fração de área da RC também contribui positivamente com a tenacidade. O eletrodo E com maior teor de Mo (0.396%) apresenta o menor valor de energia absorvida, concluindo-se que para valores superiores ao do eletrodo D, o Mo influencia negativamente na tenacidade do metal de solda. Com isso, os resultados dos ensaios Charpy V indicam que o Mo não influencia no aumento da tenacidade até o teor de 0.25%. Porém, acima deste valor o Mo influencia negativamente na tenacidade, promovendo a formação dos carbeto combinados com a ferrita formando o micro-constituente AFC. Outro possível motivo que pode justificar a queda da tenacidade é a presença das micro-trincas de hidrogênio encontradas no metal de solda do eletrodo E, pesquisadas em trabalho anterior [19]. Apesar do caráter oxidante do eletrodo, o metal de solda apresentou micro-trincas devido às regiões de fragilidade caracterizadas por agregados ferrita-carbeto alinhados ao longo dos contornos de grãos de austenita prévia.

Analisando os valores percentuais de alongamento e estrição obtidos nos ensaios de tração não é possível dizer que o Mo influencia a ductilidade do metal de solda em função da grande variação dos resultados. As superfícies de fratura foram então observadas no MEV. Conforme exemplificado pela micrografia da Figura 65 correspondente ao eletrodo D, o micro-mecanismo de fratura em todos os casos foi o de nucleação e crescimento de micro-cavidades. Por outro lado a presença de defeitos nas superfícies de fratura relacionadas aos eletrodos A, C e D indicam que esta foi a causa da baixa ductilidade observada nestes casos. A Figura

64 documenta as considerações acima exemplificando para as superfícies de fratura correspondentes aos eletrodos B e C.

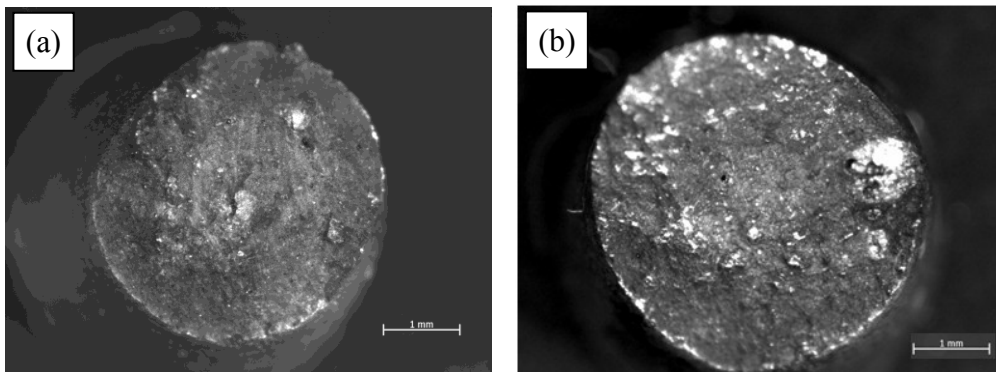


Figura 64: Superfície de fratura (a) do eletrodo B e (b) do eletrodo C

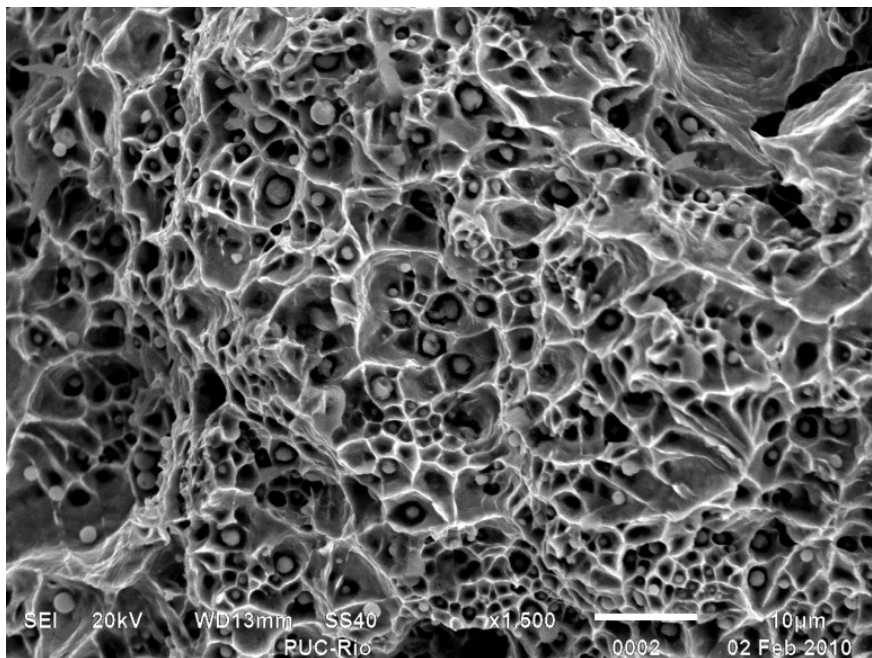


Figura 65: Superfície da fratura do metal de solda (eletrodo D). Aumento 1.500X

Portanto, não é possível a partir dos presentes resultados analisar a influência do Mo na ductilidade do metal de solda.

De acordo com os resultados de L.E, L.R e dureza verificam que estas propriedades crescem continuamente com o aumento do teor de Mo.

Os mecanismos de aumento de resistência potencialmente atuantes neste caso são: a) refino de grão, b) solução sólida (Mo) e c) dispersão de segunda fase (partículas de AFC). Plotando-se os valores de L.R em função do tamanho de grão e da quantidade de AFC (Figura 66 e Figura 67), considerando que o teor de Mo

em solução sólida na ferrita deve-se manter constante a partir da menor adição de Mo registrada, é razoável propor que os mecanismos a e b atuam apenas no primeiro estágio de adição de Mo (até 0.099%). O aumento de resistência observado a partir deste teor parece estar relacionado predominantemente ao acréscimo da quantidade de AFC.

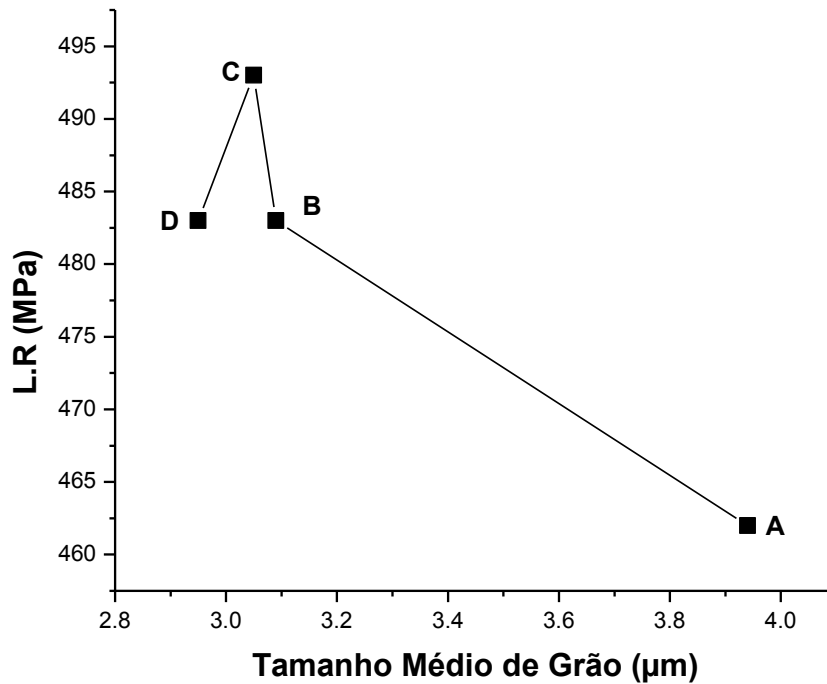


Figura 66: Relação entre o L.R e tamanho médio de grão

O gráfico mostra que a queda abrupta do tamanho médio de grão influencia no L.R do metal de solda, aumentando consideravelmente esta propriedade de resistência. Após esta queda, o tamanho médio de grão se mantém praticamente constante, porém o L.R continua aumentando. Portanto, pode-se presumir que o aumento do L.R é causado inicialmente pelo refino de grão e que isso esteja influenciando no aumento da resistência do metal de solda.

A investigação sobre o aumento contínuo do L.R tornou possível avaliar os valores desta propriedade relacionando com os resultados das outras propriedades mecânicas. Com isso, foi possível obter resultados que deram uma visão geral de como cada propriedade mecânica influencia sobre a outra. Estes resultados podem ser vistos e discutidos nos gráficos da Figura 67 e da Figura 68.

A análise do gráfico da Figura 67 mostra que existe uma relação entre o L.R e a fração de AFC. Nota-se que o L.R aumenta com o aumento de AFC. A Figura 68 apresenta a relação entre dureza e L.R onde se pode observar que a dureza aumenta junto com o aumento de L.R.

Assim, esta investigação mostra que os AFC começam a influenciar no L.R após o refino do grão, onde o seu tamanho médio mantém um comportamento praticamente estável. A dureza também influencia positivamente no L.R, porém a causa do aumento da dureza se dá por dois fatores, o refino dos grãos (onde não apresenta influencia constante sobre o L.R) e pela presença dos AFC no metal de solda, onde sua fração de área aumenta juntamente com o aumento do teor de Mo.

Com isso, se pode afirmar que a adição controlada de molibdênio no metal de solda traz resultados positivos para algumas das propriedades mecânicas, tais como dureza, L.E, L.R onde a formação dos micro-constituintes, refino dos grãos, fração de área da RGF obtidos nesta pesquisa são fatores determinantes que contribuem para o aumento das propriedades mecânicas citadas acima. Com relação à tenacidade, não se registram perdas com a adição de Mo até o valor de 0.25%Mo.

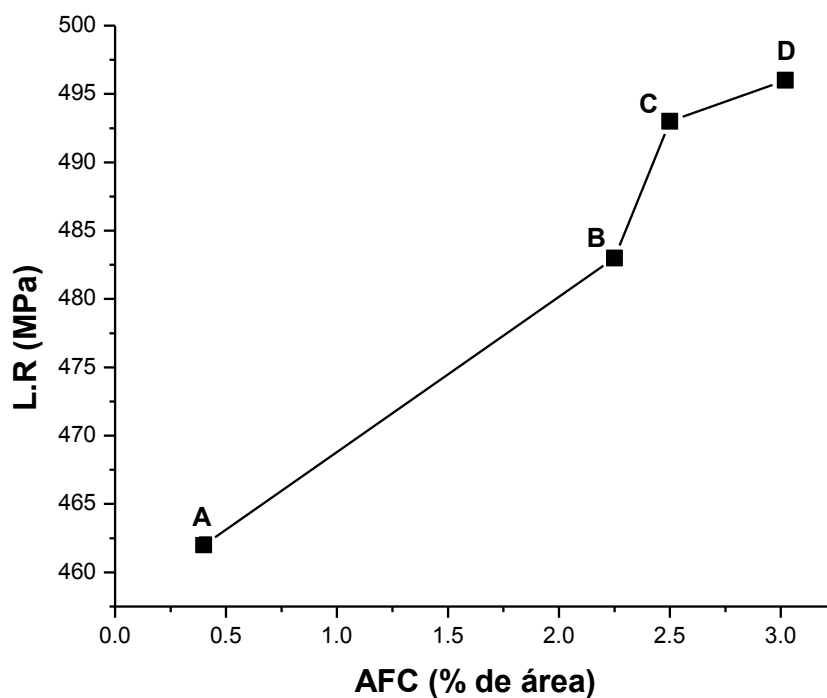


Figura 67: Relação entre o L.R e AFC

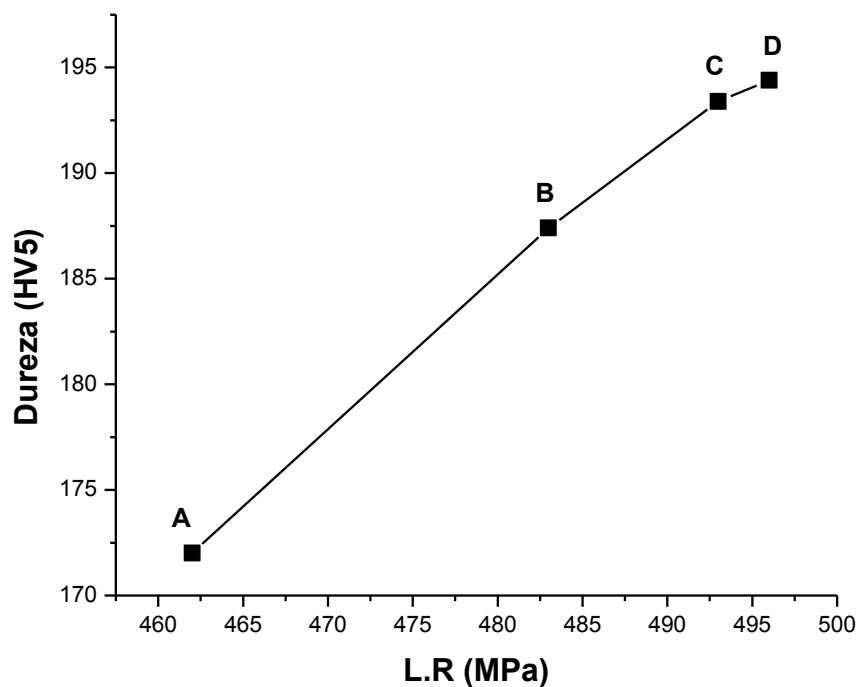


Figura 68: Relação entre a dureza e o L.R

Com base nos resultados encontrados nesta pesquisa, foi possível estipular uma faixa confiável dos teores de molibdênio para produção de eletrodos revestidos que forneçam metais de solda com resistência mecânica que possam almejar os critérios de qualificação para a classe A da norma AWS D3.6M:1999 [1]. Esta faixa confiável dos teores de Mo escolhidos foram baseados nos valores de limite de resistência e, principalmente, nos valores médios de energia absorvida (ensaio Charpy V).