

## 6 Discussão

A introdução de wustita no revestimento apresentou algumas dificuldades que deverão se traduzir em limitações quando da sua aplicação em escala industrial. A wustita não é uma fase estável em temperaturas abaixo de 575°C, mas apresenta uma cinética de transformação lenta. Como as matérias primas para a confecção de eletrodos devem ser moídas para atingir granulometria adequada existe a tendência de transformação da wustita em magnetita e ferro durante a moagem convencional. Adicionalmente existe a dificuldade de aquisição de carepas com controle de granulometria e de composição química.

Assim, em função das dificuldades relatadas, não foi possível substituir integralmente a hematita por wustita, conforme atestado pelos resultados de análises por difração de raios X (Figura 20).

Devido às características do dispositivo de extrusão, o comprimento dos eletrodos confeccionados ficou limitado a 10 cm. Em consequência, em vários casos houve dificuldades de abertura de arco e ocorrência de cordões de solda de aspecto irregular. Apesar de tais dificuldades, os eletrodos produzidos permitiram realizar, com algumas limitações, um estudo exploratório conclusivo dentro dos objetivos pretendidos. Resultados mais precisos podem ser alcançados com a utilização de eletrodos de maior comprimento.

Para analisar os fenômenos que ocorreram durante a soldagem ao introduzir wustita no revestimento dos eletrodos, devem-se observar as variações que ocorreram na fase líquida (gota e poça de fusão) em relação à sua composição química, principalmente considerando os elementos oxigênio, silício, manganês e carbono.

Pope (1995) mostrou em um dos seus trabalhos que para eletrodos oxidantes contendo diferentes quantidades de hematita, o valor de oxigênio no metal de solda foi de  $\approx 0,2\%$ . Este valor de oxigênio pode aumentar até 0,22% devido à decomposição da hematita, no arco, em magnetita e/ou wustita, liberando oxigênio. O mesmo autor afirma que de acordo com alguns pesquisadores o

processo de oxidação inicia na ponta do eletrodo e continua durante a transferência da gota em direção à poça de fusão, ocasionando perda dos elementos desoxidantes, especialmente do silício e do manganês. Estes elementos podem vir do metal de base, do arame do eletrodo ou do fluxo da solda (Liu, Olson, 1987).

Pope (1995) mostrou nos seus resultados que existe uma tendência de metais de solda de eletrodos oxidantes terem baixo teor de carbono e níveis de oxigênio altos, influenciada também pelo baixo teor de carbono no arame do eletrodo e pela menor quantidade de elementos desoxidantes no fluxo. Já para eletrodos rutilicos comerciais, os metais de solda apresentam, como regra geral, maior teor de carbono e mais baixo nível de oxigênio, devido à presença de desoxidantes e algumas vezes ao carbonato de cálcio presente no revestimento do eletrodo.

Durante o processo de formação da gota e da poça de fusão o excesso de oxigênio é liberado de solução e combinado com elementos de liga desoxidantes, tais como manganês, silício e outros, para formar inclusões, as quais podem permanecer em solução no líquido ou se incorporar à escória. Liu e Olson (1987) observaram que o aumento do teor de manganês no revestimento, diminui a quantidade de oxigênio no metal de solda, reduzindo a quantidade e o tamanho das inclusões.

Conforme o exposto acima, considerando o maior potencial de oxigênio da hematita em relação à wustita, é previsto que ao substituir parte da hematita por wustita, a quantidade de oxigênio disponível reduza, resultando em menores perdas de silício, manganês e carbono. Tal expectativa não foi confirmada, conforme o gráfico da Figura 40, onde se observa comportamento oposto em relação ao manganês e ao carbono. O teor de silício permaneceu aproximadamente constante porque o teor deste elemento no arame já era muito baixo (da ordem de 0,02%).

A explicação para tal aparente contradição em relação aos teores de manganês e carbono pode ser encontrada pela identificação de outros mecanismos mais influentes que ocorrem durante a transferência metálica, e que são sugeridos a seguir.

A adição de wustita em substituição à hematita implica em que menos energia seja consumida na fusão do revestimento. Isto traz como consequência

aceleração no consumo do revestimento e, portanto, formação de crateras menos profundas na ponta do eletrodo.

Se este mecanismo de fato atua, é de se esperar que o arco fique mais curto resultando em redução da tensão do arco e no aumento do número de curtos circuitos, o que foi constatado no presente trabalho (Tabela 5).

Como consequência, tem-se o aumento do tamanho das gotas e do seu tempo de residência na ponta do eletrodo, permitindo assim maior intensidade das reações de oxidação. Esta é a hipótese formulada no presente trabalho para explicar que o fenômeno predominante na evolução da composição química do metal de solda com a variação de wustita não é a ação do oxigênio disponível pela decomposição da hematita. Esta hipótese é suportada primeiramente pela comparação entre as variações de Mn, C, tensão média do arco ( $V_m$ ) e número de curtos circuitos (NCC) com a fração de wustita (vide Figura 63). Adicionalmente, é suportada pelos resultados e interpretações de Pessoa (2007), relacionando a queda de tensão e o aumento do número de curtos circuitos com a variação da composição química no mesmo sentido observado no presente trabalho.

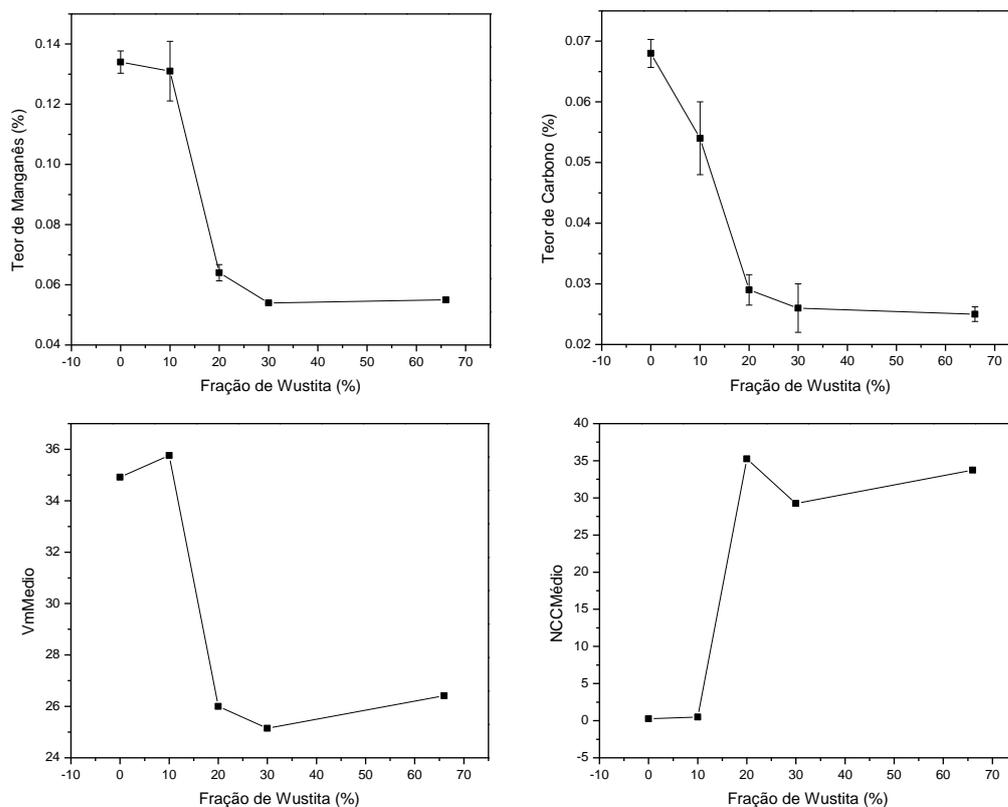


Figura 63 – Variações dos teores de C e Mn, da  $V_m$  média e de NCC médio versus fração de wustita.

A evolução microestrutural comportou-se de forma coerente com a evolução dos teores de manganês e carbono isto é, maiores teores de ferrita pró-eutetoide foram observados nas soldas com os menores teores destes elementos como mostrado na Figura 64 e na Figura 65.

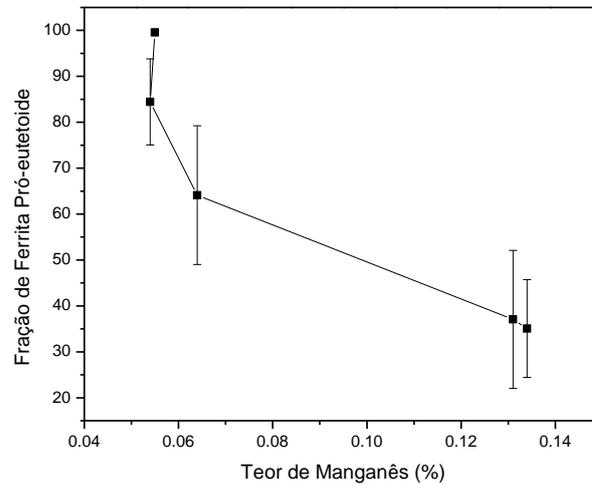


Figura 64 – Fração de ferrita pró-eutetoide em função do teor de manganês

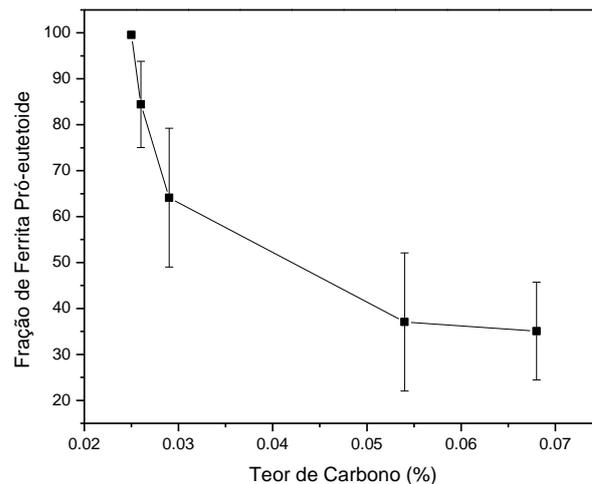


Figura 65 – Fração de ferrita pró-eutetoide em função do teor de carbono

A micro-dureza foi diretamente influenciada pela microestrutura apresentando valores maiores com o aumento da fração de ferrita com segundas fases (Figura 62).

A avaliação da influência da fração de wustita no teor de hidrogênio resultou inconclusiva devido ao pequeno número de testes válidos e da elevada variabilidade observada. Seria necessário produzir um maior número de eletrodos, para obter resultados estatisticamente representativos.

A comparação entre os dois métodos de análise de inclusões não foi possível já que mostraram tendências opostas com a variação da fração de wustita. É importante lembrar que as condições de formação de imagens nos dois

microscópios são muito diferentes. No MO utilizou-se a lente de maior aumento (100X), no limite de resolução do equipamento. Isto implica que as menores inclusões podem apresentar contraste muito baixo. Assim, uma determinada quantidade de inclusões é invisível e algumas ainda podem ser eliminadas no processamento da imagem.

Por outro lado, o aumento utilizado no MEV é cerca de 4 vezes maior, levando a um campo 16 vezes menor. Desta forma, a área amostrada é muito menor do que no caso do MO, podendo implicar em perda de representatividade.

Ainda que a resolução espacial do MEV seja superior à do MO, a presença de ruído pode mascarar a detecção de pequenas inclusões. Ainda que a rotina de processamento de imagens seja capaz de reduzir este ruído, ela não será capaz de detectar inclusões totalmente mascaradas por ele.

O método de medição por MEV tem sido mais empregado e pelas razões acima expostas parece ser mais confiável para identificar tendências na variação da fração de área de inclusões, mas os resultados obtidos indicam que é necessário prosseguir nestas análises para obter resultados conclusivos.

As implicações positivas na substituição da hematita por wustita são:

- Manutenção dos baixos teores de hidrogênio difusível.
- Possibilidade de redução da fração de área de inclusões (a ser confirmada).
- Melhoria da soldabilidade operatória, constatada pelo melhor aspecto de cordão.

As implicações negativas na substituição da hematita por wustita são:

- Dificuldade na utilização da wustita devido à disponibilidade e as técnicas para sua redução.
- Perda dos teores de manganês e carbono o que leva a perda das propriedades mecânicas do metal de solda.
- Microestrutura mais macia.

Sugere-se para trabalhos futuros fazer experimentos adicionando wustita no revestimento de eletrodos que tenham comprimento maior, condições de soldagem controladas (incluindo medição de temperatura e velocidade de soldagem), e soldas em chanfro para posterior análise de propriedades mecânicas, porosidade e de inclusões mediante comparação dos métodos MO e MEV.