

## 5 Resultados

Os resultados deste conjunto de experimentos serão apresentados da seguinte forma:

- Características operacionais dos eletrodos, incluindo avaliação visual da qualidade da solda e curvas tensão-corrente;
- As seguintes características do metal de solda foram avaliadas em função da fração de wustita presente nos eletrodos:
  - A fração de cada micro-constituente,
  - A fração de inclusões,
  - A concentração dos principais elementos químicos,
  - A concentração de hidrogênio difusível e
  - A micro-dureza

### 5.1. Características operacionais dos eletrodos

A qualidade dos cordões soldados com cada um dos eletrodos experimentais desenvolvidos foi avaliada visualmente. A morfologia das soldas foi afetada por cada uma das composições dos revestimentos dos eletrodos.

A análise qualitativa das soldas feitas pode ser resumida assim:

Para os cordões com porcentagens de wustita de 66%, 30% e 20% pode-se dizer, de modo geral, que o arco elétrico apresentou maior estabilidade, maior deposição da solda e maior molhabilidade. Além disso, o arco se manteve estável e a transferência se deu por curto circuito. Já para os cordões com porcentagens de wustita de 10% e 0% o arco teve que ser aberto a mão para todos os passes, exceto o primeiro, os cordões foram mais curtos e apresentaram superfície grosseira e irregularidades no formato do cordão. Pode-se dizer que o aspecto do cordão foi mudando e melhorando com o aumento da quantidade de wustita.

Todos os cordões apresentaram fácil remoção de escória e escamas foram finas. As fotografias dos cordões são apresentadas na Figura 35.

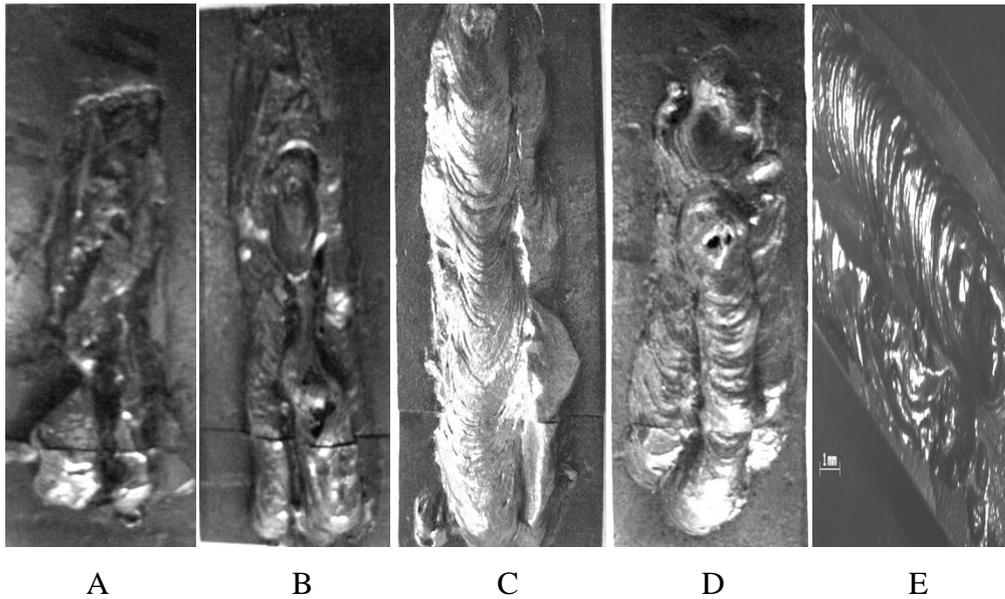


Figura 35 – Fotomacrografia das soldas feitas

Também foram medidas a corrente de soldagem e a tensão para tentar estabelecer padrões de comportamento das soldas feitas e observar diferenças entre elas à medida que se aumenta a quantidade de wustita.

Dos dados obtidos para fazer os gráficos somente tomaram-se 5 segundos de estabilidade do arco elétrico.

Notaram-se diferenças relevantes nos oscilogramas. O número de curtos-circuitos aumentou e a tensão do arco diminuiu com o aumento da fração de wustita. A título de ilustração são apresentados oscilogramas na Figura 36 para as amostras A (0% de wustita) e C (20% de wustita). Os demais resultados são apresentados na Tabela 5, incluindo o número de curtos-circuitos (NCC), tensão média ( $V_m$ ) para cada um dos passes (P1, P2, P3 e P4) e os seus valores médios.

Tabela 5 – Características operacionais da soldagem

FeO (%)	NCC (P1)	$V_m$ (P1)	NCC (P2)	$V_m$ (P2)	NCC (P3)	$V_m$ (P3)	NCC (P4)	$V_m$ (P4)	NCC (Médio)	$V_m$ (Média)
0	0	39.2	0	29.63	0	38.86	1	31.98	0.25	34.92
10	0	32.15	0	33.93	0	42.36	2	34.61	0.5	35.76
20	41	27.55	55	19.26	44	23.76	1	33.42	35.25	25.99
30	5	32.62	9	29.36	103	18.9	381	19.72	29.25	25.15
66	19	21.67	31	33.33	2	28.7	83	21.97	33.75	26.42

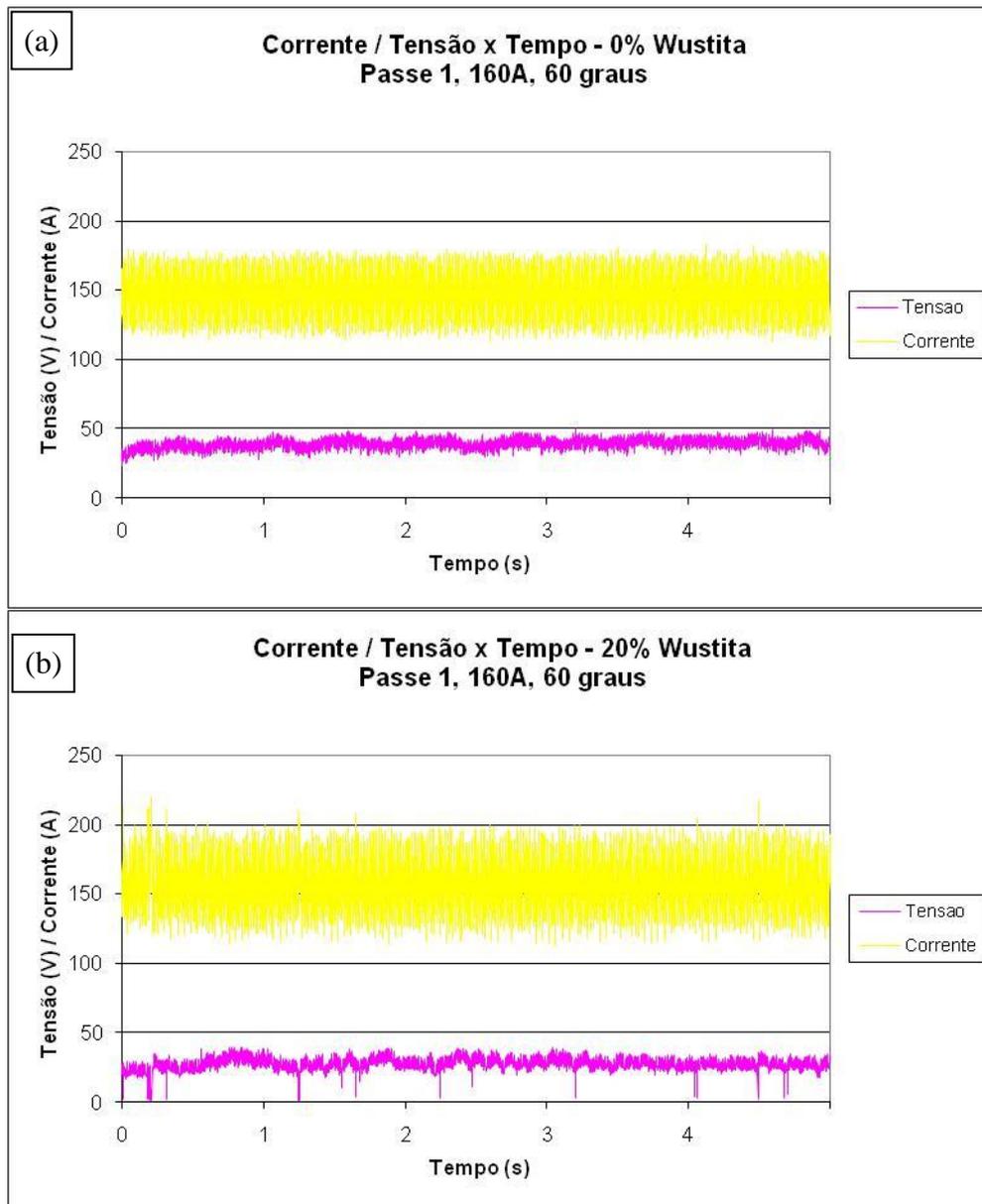


Figura 36 – Exemplo típico da relação entre a corrente e a tensão para um primeiro passe. (a) Amostra A (0% de wustita). (b) Amostra C (20% de wustita).

## 5.2. Caracterização do metal de solda

### 5.2.1. Análise Química

Foram analisados os metais de solda das cinco amostras executadas e o resultado é mostrado na Tabela 6. O valor mostrado na tabela corresponde a media de entre três e cinco queimas feitas para cada uma das amostras.

Tabela 6 – Composição química dos metais de solda (% em peso)

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>C</i>	0,068	0,054	0,029	0,026	0,025
<i>Si</i>	0,022	0,049	0,015	0,006	0,006
<i>P</i>	0,019	0,018	0,016	0,014	0,017
<i>S</i>	0,009	0,010	0,010	0,010	0,007
<i>Mn</i>	0,134	0,131	0,064	0,054	0,055
<i>Mo</i>	–	–	–	–	–
<i>Ni</i>	0,779	0,549	0,386	0,054	0,034
<i>Cr</i>	0,077	0,050	0,003	–	–
<i>Cu</i>	0,134	0,114	0,064	0,066	0,035
<i>Ti</i>	–	–	–	–	–
<i>V</i>	–	–	–	–	–
<i>Al</i>	–	–	–	–	–
<i>Nb</i>	–	–	–	–	–
<i>W</i>	–	0,192	–	0,011	–

Nesta tabela se observa a diminuição nos teores de carbono, manganês e silício com aumento da fração de wustita, os quais têm um papel importante na microestrutura do metal de solda.

Os gráficos da Figura 37, Figura 38 e Figura 39 mostram, respectivamente, a variação na fração C, Mn e Si, em função da fração de wustita nos eletrodos. Estes elementos são os mais relevantes devido a sua influência sobre a microestrutura, a dureza do metal de solda e a quantidade de inclusões presentes. Pode-se notar que carbono e manganês diminuem com o aumento da wustita, enquanto o silício não demonstra uma tendência tão clara. As barras de erro correspondem aos desvios padrão das medidas de análise química.

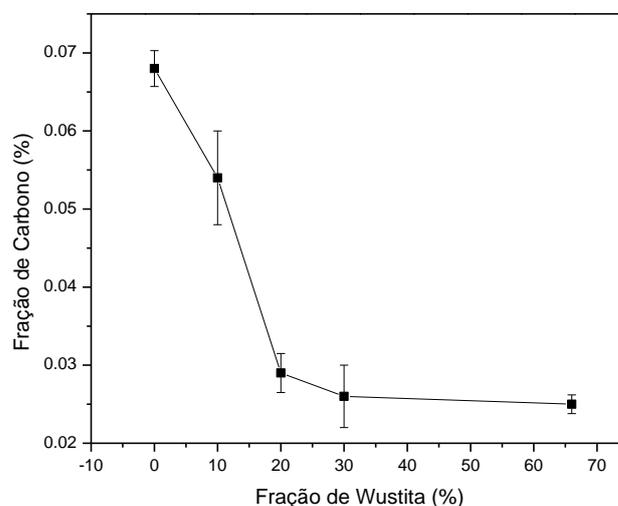


Figura 37 – Relação entre as frações de wustita e de carbono

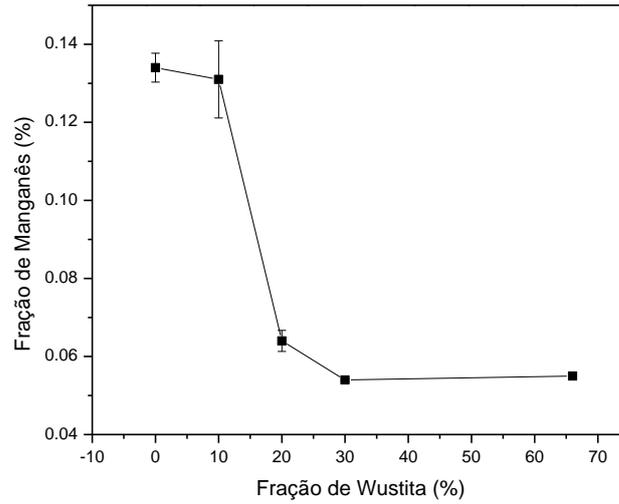


Figura 38 – Relação entre as frações de wustita e de manganês

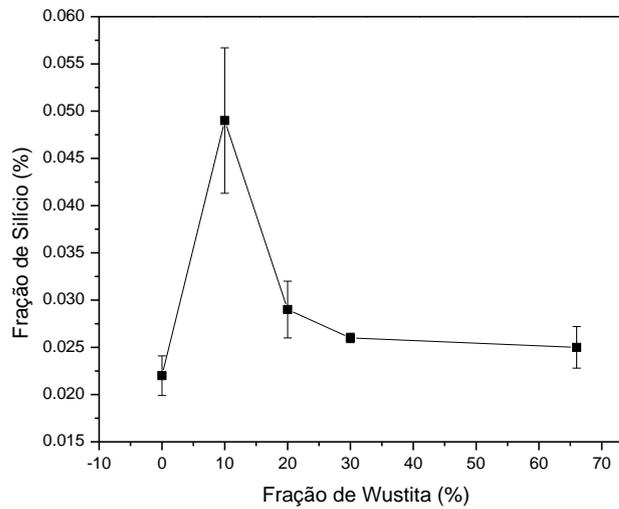


Figura 39 – Relação entre as frações de wustita e de silício

A Figura 40 permite comparar as tendências das composições químicas dos 3 elementos em um mesmo gráfico.

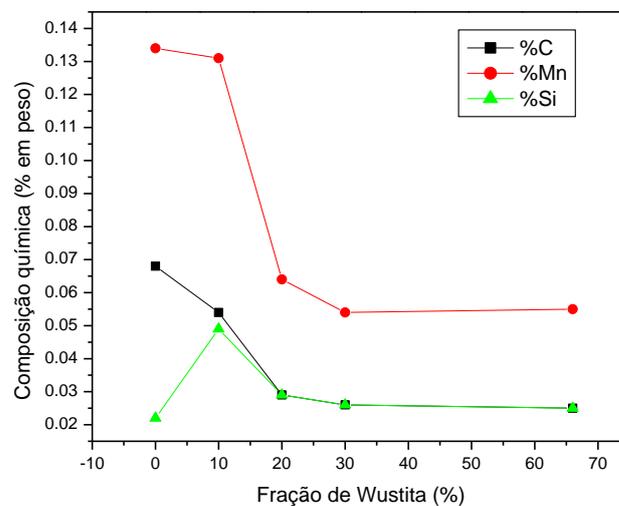


Figura 40 – Relação entre as frações de wustita e dos elementos C, Mn e Si

## 5.2.2. Caracterização microestrutural

### 5.2.2.1. Análise dos micro-constituintes

Para verificar o efeito das mudanças realizadas na formulação dos eletrodos sobre a evolução microestrutural do metal de solda, foi levado a cabo um exame metalográfico de uma seção transversal de cada uma das amostras. Micrografias típicas são mostradas desde a Figura 41 até Figura 45 para as amostras A até E, respectivamente. Todas foram obtidas com uma lente objetiva de 50X (aumento total de cerca de 500X) após ataque com Nital 2%.

Na Figura 41 estão indicados os micro-constituintes típicos: ferrita pró-eutetóide (FP), ferrita com segunda fase (FS) e ferrita acicular (FA).

Pode-se observar qualitativamente o efeito da adição de FeO no revestimento dos eletrodos sobre a microestrutura do metal solda, comparando a Figura 41 e a Figura 45. Na primeira aparecem os 3 micro-constituintes, enquanto na segunda, corresponde à maior proporção de wustita, aparece quase que exclusivamente a FP.

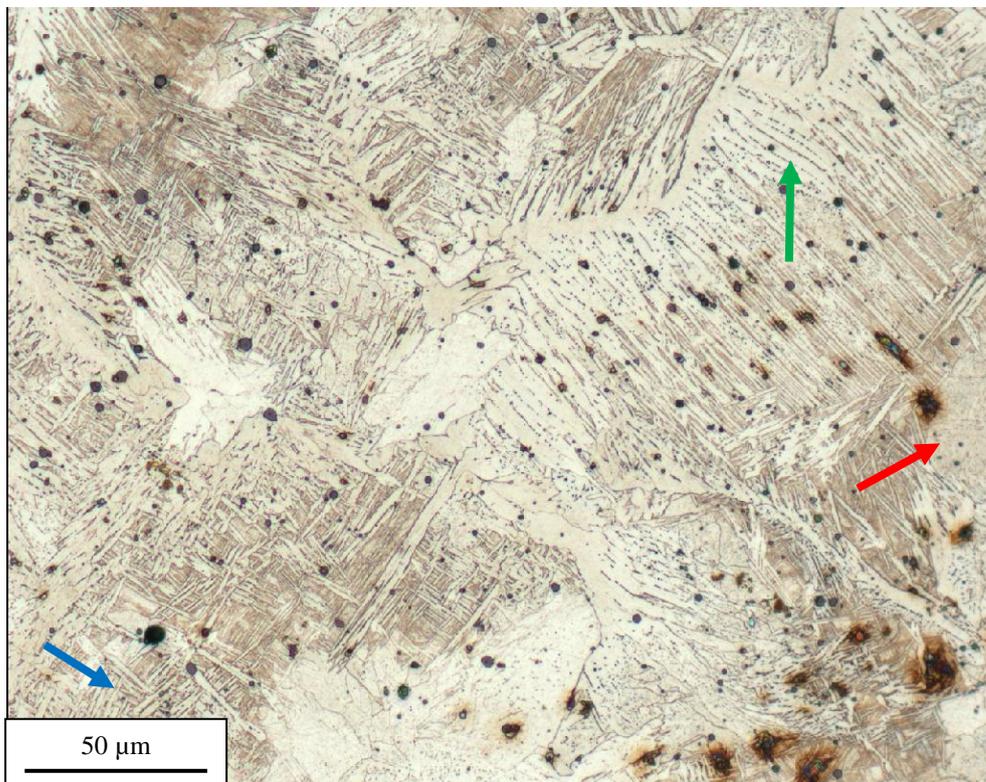


Figura 41 – Aspecto micrográfico da amostra com 0% FeO. A seta em cores vermelha, verde e azul indica, respectivamente, ferrita pró-eutetoide, ferrita com segunda fase e ferrita acicular.

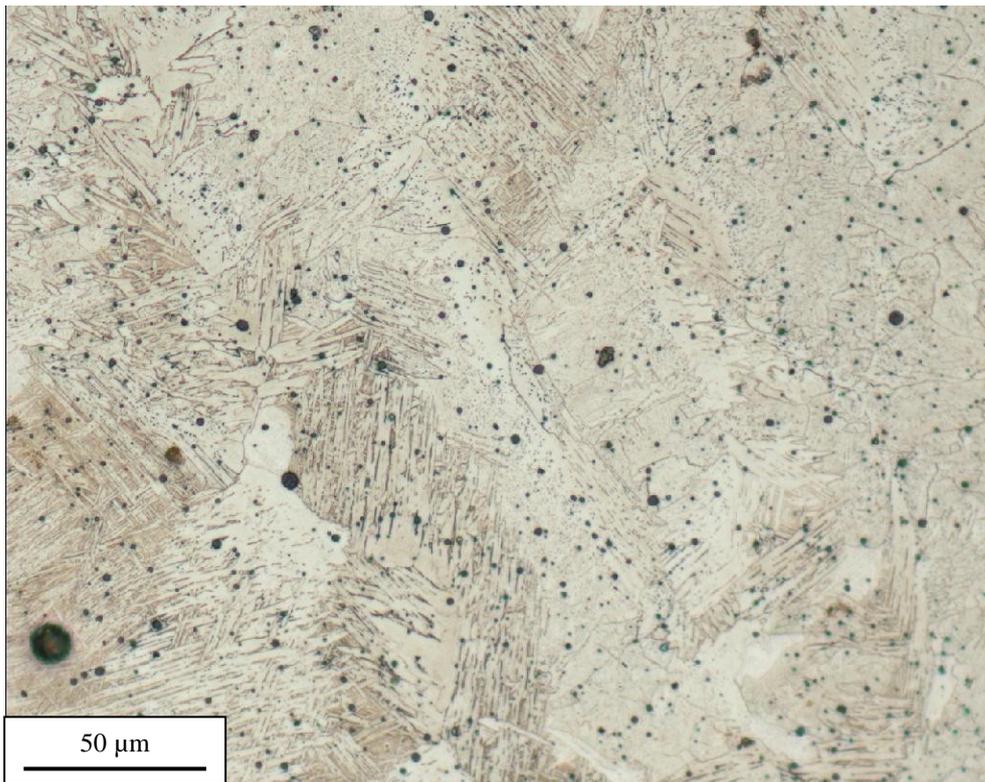


Figura 42 – Aspecto micrográfico da amostra com 10% FeO.

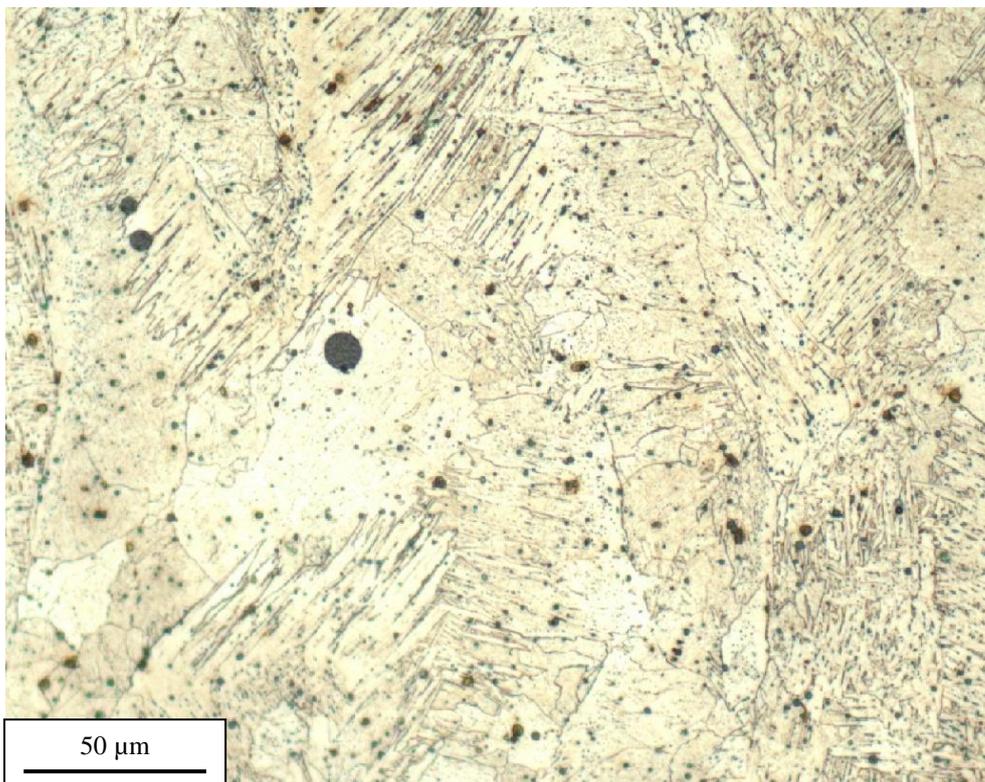


Figura 43 – Aspecto micrográfico da amostra com 20% FeO.

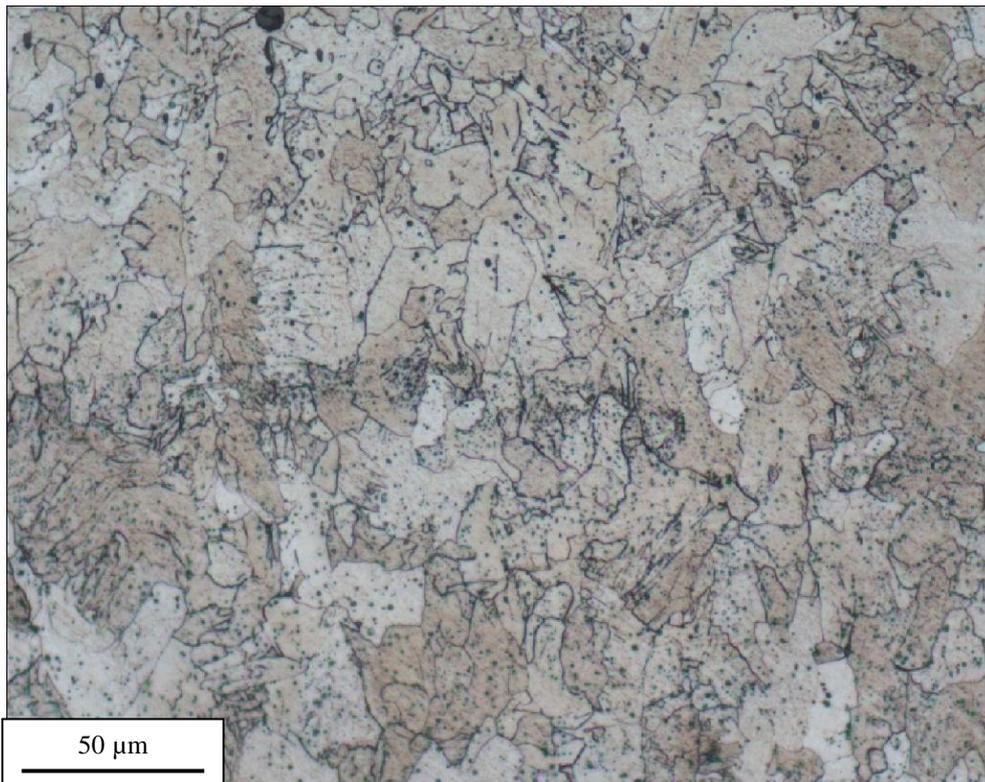


Figura 44 – Aspecto micrográfico da amostra com 30% FeO.

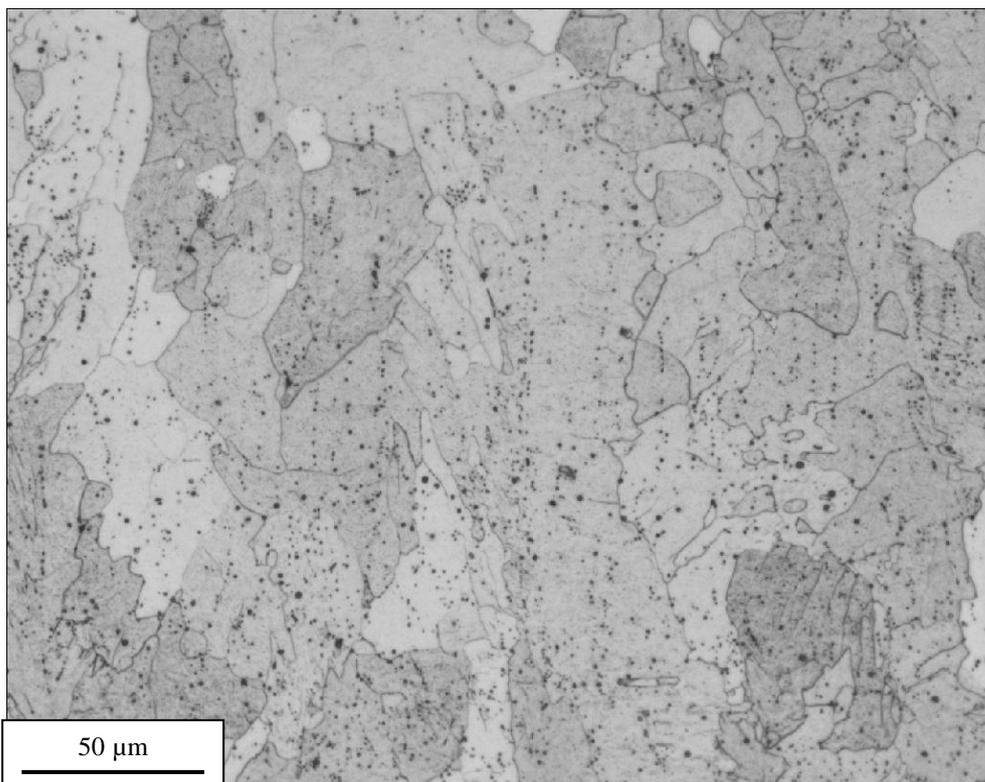


Figura 45 – Aspecto micrográfico da amostra com 66% FeO.

Os resultados da quantificação destes micro-constituintes utilizando a rotina descrita na Seção 4.7.2 são apresentados nos gráficos da Figura 46 até Figura 52.

Os 3 primeiros gráficos de caixa (Box-plot) mostram a dispersão das medidas para cada amostra e cada fase. Conforme comentado anteriormente, foram obtidos 3 mosaicos por amostra, cada um com um número variável de campos. Como não foi identificada variação sistemática dentro de cada mosaico, nem entre mosaicos, as medidas de todos os campos dos 3 mosaicos foram tratadas em conjunto. A partir destes gráficos é possível também visualizar as tendências dos micro-constituintes como função da fração de wustita.

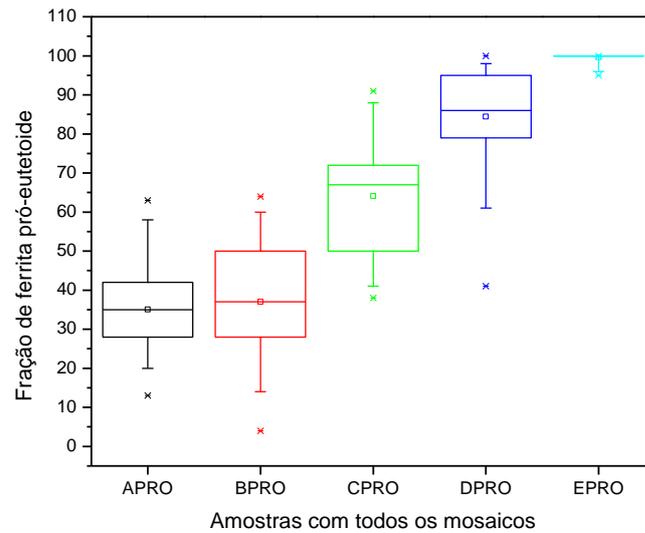


Figura 46 – Relação entre as cinco amostras com a fração de ferrita pró-eutetoide

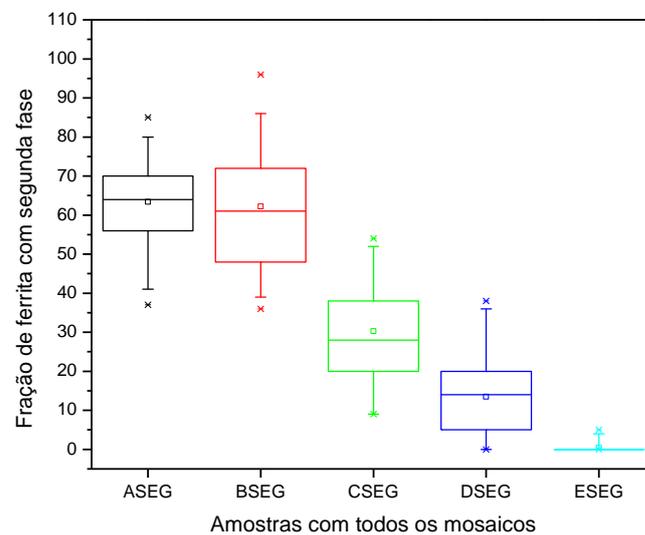


Figura 47 – Relação entre as cinco amostras com a fração de ferrita com segunda fase

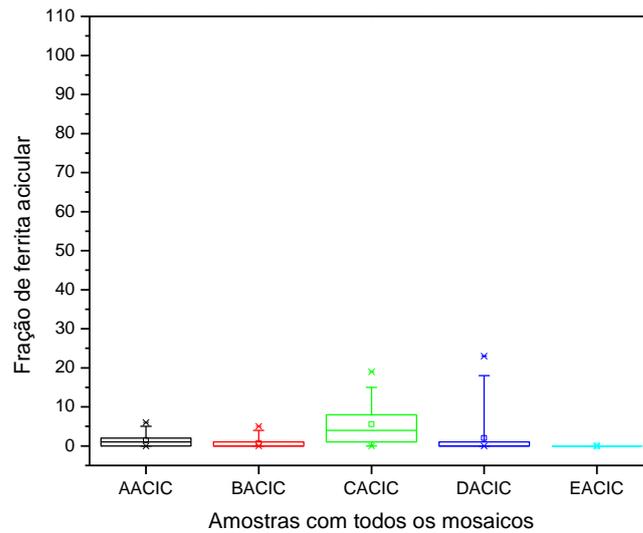


Figura 48 – Relação entre as cinco amostras com a fração de ferrita acicular

Os valores médios e os desvios-padrão para cada micro-constituente e para cada amostra estão apresentados nos gráficos seguintes (Figura 49, Figura 50, Figura 51). Duas tendências claras se manifestam: a fração de FP cresce e a de FS decresce com a fração de wustita. As frações máximas de FP e FS são de 100% e 65%, respectivamente. A FA aparece sempre em muito baixa fração e não apresenta nenhuma tendência particular.

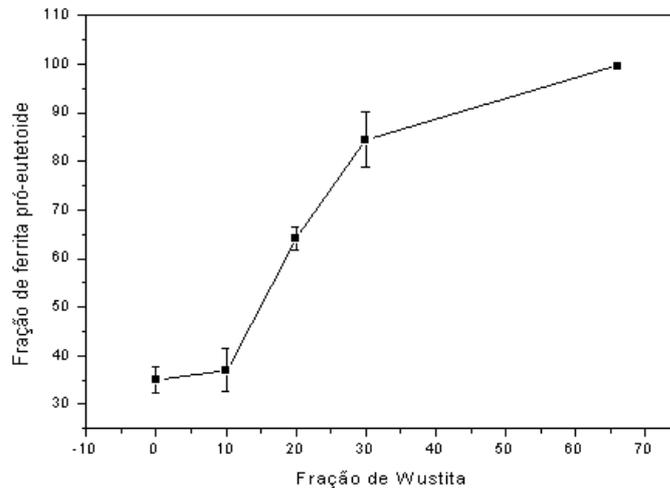


Figura 49 – Relação entre a fração de wustita e a fração de ferrita pró-eutetoide

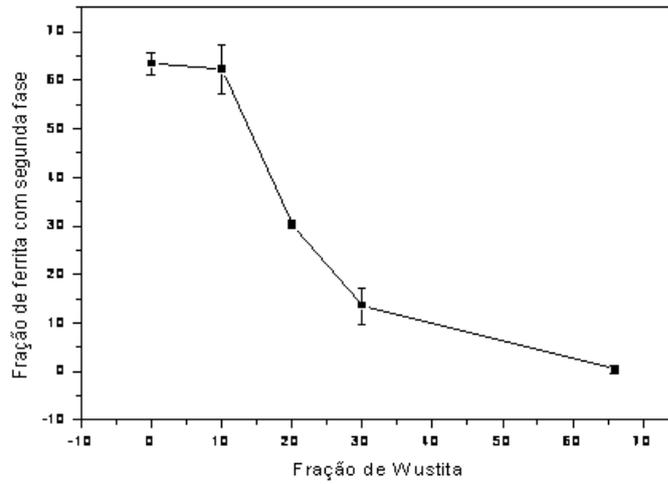


Figura 50 – Relação entre a fração de wustita e a fração de ferrita com segunda fase

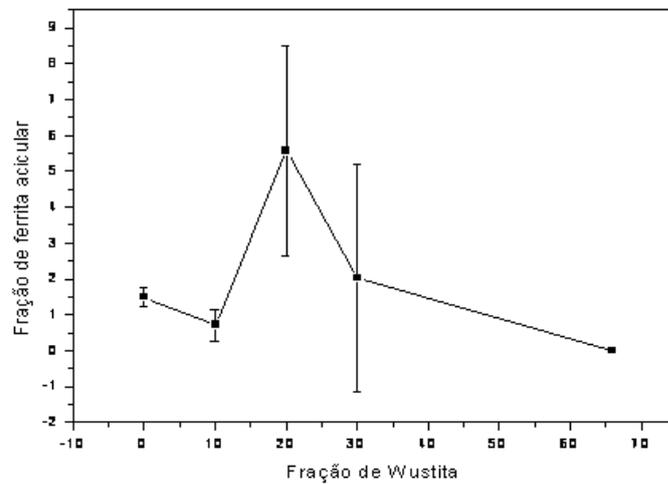


Figura 51 – Relação entre a fração de wustita e a fração de ferrita acicular

O gráfico da Figura 52 permite comparar, na mesma escala, a dependência dos 3 micro-constituintes com a fração de wustita.

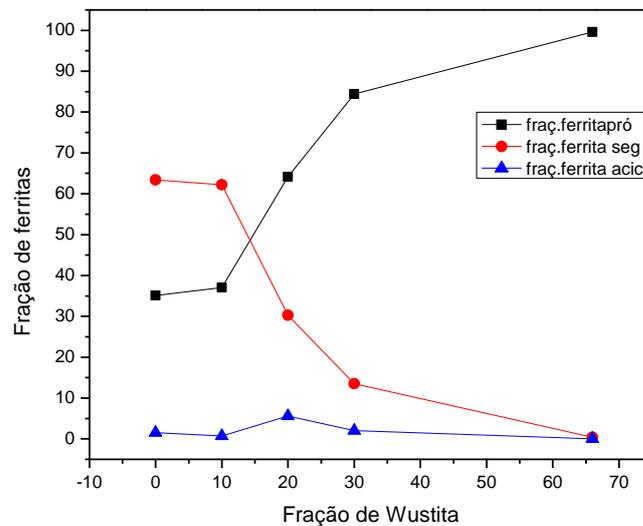


Figura 52 – Relação entre as cinco amostras com a fração de cada uma das microestruturas

### 5.2.2.2. Análise das inclusões

A fração de área de inclusões ( $A_A$ ) foi medida para imagens de MO e MEV, utilizando as rotinas descritas na secção 4.6.

A Figura 53 e a Figura 54 mostram os resultados médios para MO e MEV, respectivamente. Estes resultados são contraditórios, já que  $A_A$  mostra tendências opostas quando medida com os dois tipos de microscópio.

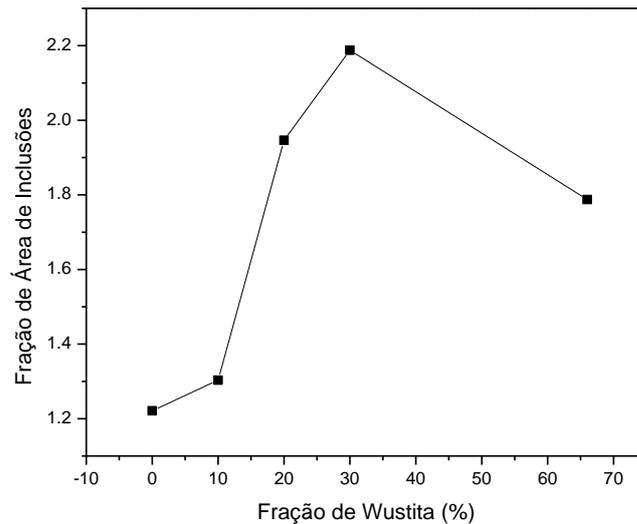


Figura 53 – Relação entre a fração de wustita com a fração de área de inclusões no MO

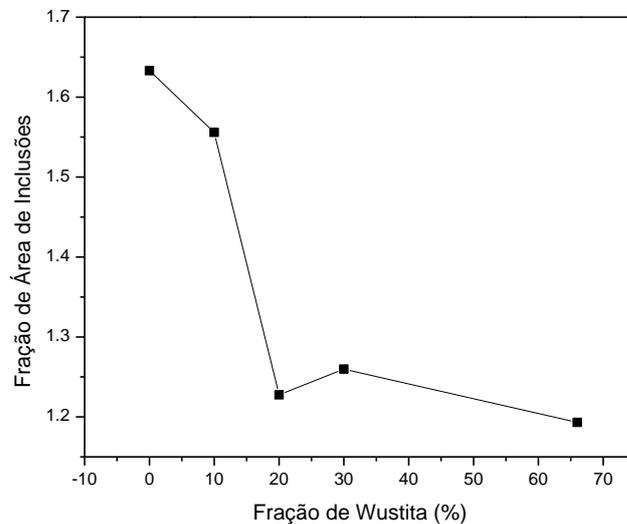


Figura 54 – Relação entre a fração de wustita e a fração de área de inclusões no MEV.

### 5.2.3. Hidrogênio difusível

A Tabela 7 mostra os resultados de hidrogênio difusível obtidos.

Tabela 7 – Resultados de hidrogênio difusível

<i>Eletrodo</i>	<i>H<sub>dif</sub> (ml/100g)</i>			<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>
<i>A</i>	18.9	24.5	–	21.7	3.96
<i>B</i>	13.4	38.4	11.4	21.07	15.04
<i>C</i>	37.8	23.5	–	30.65	10.11
<i>D</i>	34.8	21.4	16.8	24.33	9.35
<i>E</i>	<b>15.1</b>	<b>18.2</b>	<b>18.7</b>	<b>17.33</b>	<b>1.95</b>

A dispersão de valores das medidas é bastante alta, exceto para os eletrodos A e E. Esta dispersão está associada à pequena quantidade de amostras utilizadas para estes ensaios, conseqüência do pequeno tamanho das peças soldadas.

De toda forma, parece haver uma tendência de queda dos valores medidos conforme a fração de wustita cresce acima de 20%. O gráfico da Figura 55 mostra esta tendência a partir dos valores médios ( $\pm$  um desvio padrão). O valor médio obtido para a amostra E é próximo daqueles obtidos por vários pesquisadores que fizeram testes envolvendo eletrodos comerciais (Gooch, 1983; Stalker, 1987; Nóbrega, 1981) cujo valor de hidrogênio difusível para soldas feitas com eletrodos oxidantes foi de aproximadamente 15ml/100g.

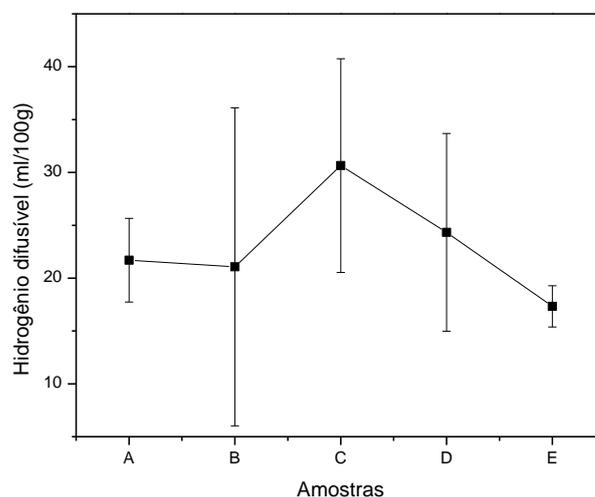


Figura 55 – Valores de hidrogênio difusível para cada uma das amostras

#### 5.2.4. Análise de micro-dureza

O gráfico da Figura 56 mostra os resultados de micro-dureza em função da fração de wustita. Cada ponto corresponde ao valor médio das medidas. As barras

de erro correspondem a  $\pm$  um desvio padrão. A micro-dureza apresenta uma tendência de queda com o aumento da fração de wustita.

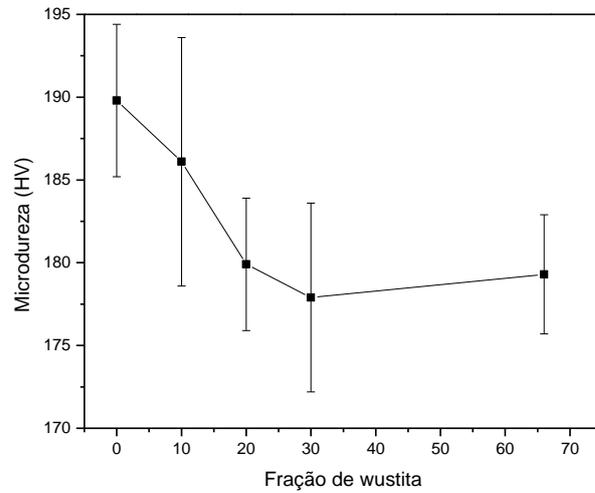


Figura 56 – Relação entre a micro-dureza e fração de wustita.

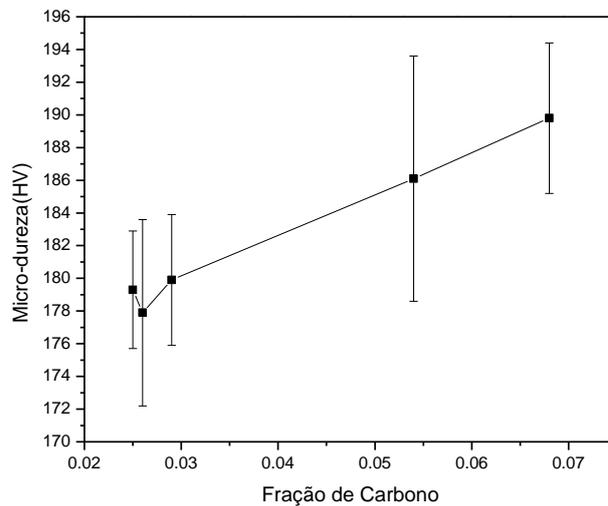


Figura 57 – Relação entre a micro-dureza e a fração de carbono

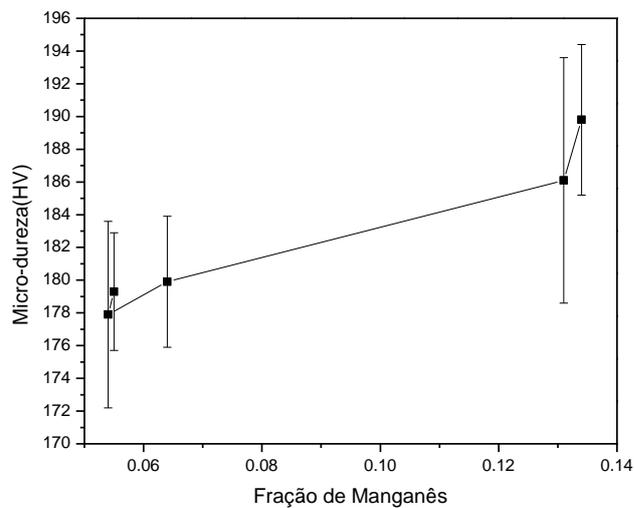


Figura 58 – Relação entre a micro-dureza e a fração de manganês

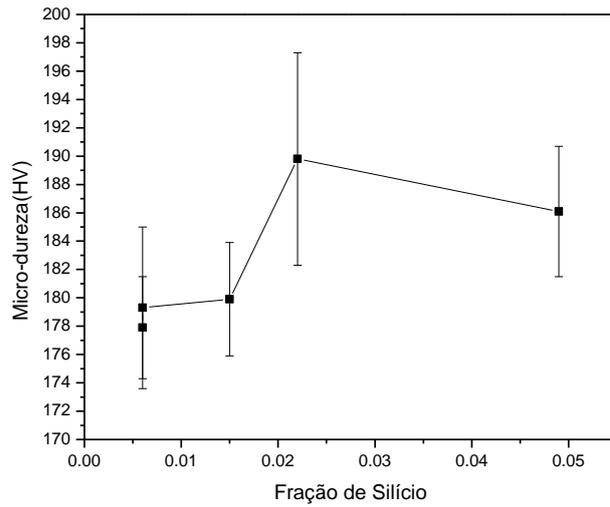


Figura 59 – Relação entre a micro-dureza e a fração de silício

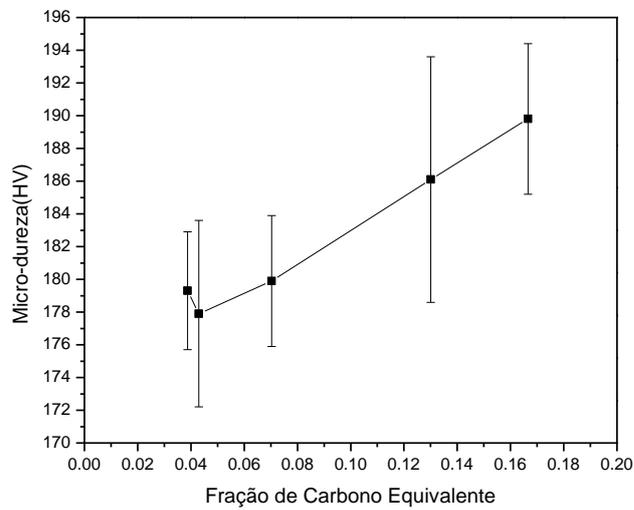


Figura 60 – Relação entre a micro-dureza e a fração de carbono equivalente

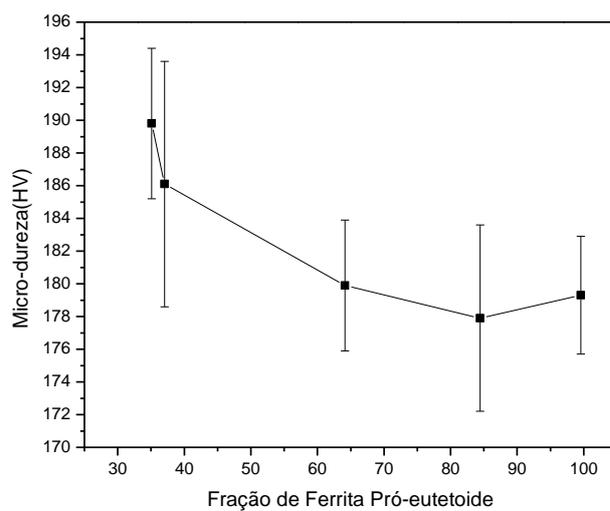


Figura 61 – Relação entre a micro-dureza e a fração de ferrita pró-eutetoide

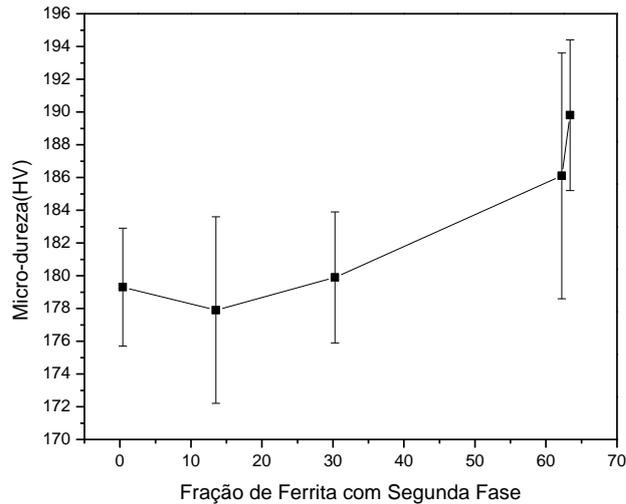


Figura 62 – Relação entre a micro-dureza e a fração de ferrita com segunda fase

A Figura 57, Figura 58, e Figura 59 representam as relações que existem entre a micro-dureza e cada um dos elementos que afetam a microestrutura de um modo mais importante. À medida que aumenta a fração destes elementos no metal de solda, a dureza parece ter uma tendência a aumentar, por exemplo, para o eletrodo A com 0% de wustita, cujo valor de dureza é de  $\approx 190$  HV apresenta o teor de carbono, manganês e silício mais alto, o qual resulta coerente com os resultados da análise química e subsequente com a microestrutura de ferrita com segunda fase, própria de eletrodos oxidantes comerciais. Esta relação entre os micro-constituintes e a dureza é mostrada na Figura 61 e na Figura 62. Para o mesmo valor de dureza de  $\approx 190$  V, a ferrita pró-eutetoide apresenta o valor mais baixo o que é oposto ao valor determinado para a ferrita com segunda fase.

Como existe uma relação direta entre micro-dureza e a concentração de carbono equivalente, isto também foi avaliado e os resultados são apresentados na Figura 60 mostrando quase o mesmo efeito dos gráficos individuais dos elementos químicos.