

JAIR GASPAR DE MENDONÇA

**ESTUDO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DO BALANÇO DA ONDA
QUADRADA EM CORRENTE ALTERNADA NA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA NA SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO DE
CONSUMÍVEIS ER308L, ER309L, ER2209 E ER2594**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Especialista
em Engenharia.

São Paulo
2013

JAIR GASPAR DE MENDONÇA

**ESTUDO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DO BALANÇO DA ONDA
QUADRADA EM CORRENTE ALTERNADA NA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA NA SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO DE
CONSUMÍVEIS ER308L, ER309L, ER2209 E ER2594**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Especialista
em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo
2013

"The value of a college education is not the learning of many facts but the training of the mind to think."

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Francisco e Claudia, pois sem eles nada disso seria possível; à Maria, minha irmã, que mesmo longe sempre acreditou em mim; e à minha querida Sayuri, que me apoiou nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi, por ter compartilhado comigo um pouco do seu conhecimento e me conduzido durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço também à Lincoln Electric do Brasil, por ter disponibilizado suas instalações e materiais para a confecção dos corpos de prova; em especial à Eng. Karine d'Avila Zaccari, por ter realizado as soldagens em suas horas vagas e por ter me auxiliado inúmeras vezes me disponibilizando informações.

E por fim, agradeço a todos aqueles que, embora não sejam citados aqui, contribuíram para a realização deste trabalho, pois sem a ajuda de todos, nada disto seria possível.

CURRICULUM VITAE

I – Dados Pessoais:

Nome: Jair Gaspar de Mendonça

Data de Nascimento: 11/11/1983

Nacionalidade: Brasileiro

E-mail: jaigaspar@gmail.com

II – Formação Acadêmica:

Bacharel em Engenharia Elétrica

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Concluído em Dezembro de 2009.

III – Experiência Profissional:

INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária

Engenheiro Eletricista

- *Elaboração de projetos de sistemas de auxílio visual à navegação aérea;*
- *Elaboração de projetos de instalações elétricas BT e MT;*
- *Fiscalização de obras e serviços de Engenharia.*

RESUMO

Sabe-se que reações eletroquímicas que ocorrem durante a soldagem dependem muito da polaridade do eletrodo, aumentando ou reduzindo a concentração de vários elementos químicos no metal de solda. A soldagem com onda quadrada CA possibilita conseguir propriedades intermediárias em comparação com a soldagem com corrente contínua polaridade reversa e polaridade direta.

Neste trabalho são estudados os efeitos do balanço da onda quadrada na composição química do metal de solda utilizando a soldagem por arco submerso. Para avaliar esses efeitos foram confeccionados corpos de prova (*weld pads*) em conformidade com a norma AWS A 5.23/A5.23M, utilizando eletrodos austeníticos (ER308L e ER309L) combinados com fluxo neutro Carbox ME, da Lincoln Electric, e eletrodos duplex/superduplex (ER2209 e ER2594) combinados com fluxo SBB da Metrode.

Para os corpos de prova de ER308L e ER2209 foram utilizados eletrodos de Ø 3,2 mm de diâmetro, e para os ER309L e ER2594, eletrodos de Ø 2,4 mm de diâmetro. A densidade de corrente e o aporte térmico foi mantido constante, 55,95 A/mm² e 1,77 kJ/mm respectivamente. Para isso, foi utilizada corrente de 450 A e velocidade de soldagem de 7,62 mm/s para o arame de Ø 3,2 mm de diâmetro, e 253 A com 4,29 mm/s para o de Ø 2,4 mm. A tensão foi mantida em 30 V e o desvio de tensão (*offset*) de 0 %.

Para cada eletrodo foram feitos três corpos de prova, variando o balanço da onda em 25%, 50% e 75%, mantendo todos os demais parâmetros constantes. Então a composição química foi medida através de espectrômetro por emissão óptica, e esses valores foram, por fim, comparados.

Constatou-se que os teores do C, do Si, do Al e do O aumentam com o aumento do balanço, enquanto que os do N, do Cr e do Ni diminuem. Haja visto que aumentar o balanço significa aumentar a fração de tempo que o eletrodo permanece na polaridade reversa, isso indica que o silício e o alumínio sofrem *reações de redução catódica* mais pronunciadas na interface entre a poça e a escória, enquanto que o cromo, o níquel e o oxigênio passam por reações de oxidação anódica na interface entre a ponta do eletrodo e escória.

O carbono e o nitrogênio não sofrem reações eletroquímicas. Desta forma, o aumento do C pode ser explicado pelo bloqueio da sua oxidação devido ao aumento do silício; enquanto que a diminuição do teor de N no metal de solda ocorre, provavelmente, devido à redução do teor de oxigênio na coluna de plasma que diminui a densidade de nitrogênio monoatômico no arco elétrico.

Não foi possível observar o comportamento dos demais elementos devido à falta de repetibilidade e de amostras com diferenças estatisticamente significantes.

Palavras-chave: Soldagem por arco submerso, onda quadrada, corrente alternada, CA, aço inoxidável austenítico, aço inoxidável duplex, composição química.

ABSTRACT

It has been shown that the electrochemical reaction that occurs during the welding depends strongly on the electrode polarity, increasing or decreasing the concentration of many elements in the weld metal. The AC square wave welding allows achieving properties somewhere in between the welding with DC straight polarity and the DC reverse polarity.

In this paper it is studied the effects of the balance of the square wave in the chemical composition of the welding metal using submerged arc welding. In order to assess these effects, there were made weld pads according to the AWS A5.23/A5.23M code, using austenitic wires (ER308L and ER309L) combined with Lincoln Electric's Carbox ME neutral flux, and with duplex/superduplex (ER2209 and ER2594) with Metrode's SBB flux.

There were used Ø 3.2 mm diameter wires for ER308L and ER2209 electrodes, and Ø 2.4 mm diameter wires for ER309L and ER2594 electrodes. The current density and the heat input were the same for every welding pass, 55.95 A/mm² and 1.77 kJ/mm respectively, to achieve this the electric current and the welding speed were 450 A and 7.62 mm/s, for the Ø 3.2 mm diameter wire, and 253 A and 4.29 mm/s, for the Ø 2.4 mm diameter wire. The voltage was set to 30 V and the offset was 0 %.

For each wire, there were made three weld pads, varying the balance through 25 %, 50 % and 70%, keeping all other parameters constant. Then the composition of the welding metal in each weld pad was measured via optical emission spectrometer. And finally these values were compared.

It has been found that C, Si, Al and O increase with the increasing of the balance, and Cr, Ni and N decreases. Since increasing the balance means setting the

electrode to stay at reverse polarity for a longer time, this implies that silicon and aluminium are more prone to suffer *cathodic reduction reaction* at the pool/slag interface, while chromium, nickel and oxygen goes through anodic oxidation reaction at the electrode tip/slag interface.

Since C and N don't suffer electrochemical reactions, the increase in carbon quantity at the weld metal can be explained by the fact that its oxidation is blocked by the increase of silicon in the weld pool; while the decrease of nitrogen is probably due to the decrease of oxygen in the arc plasma, which drops the amount of monoatomic nitrogen in the electric arc.

It was not possible to infer more about other elements due to lack of samples with significant differences.

Keywords: *Submerged arc welding, SAW, squared-wave, alternate current, AC, austenitic stainless steel, duplex stainless steel, chemical composition.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do equipamento da soldagem por arco submerso [2].....	2
Figura 2: Funcionamento da soldagem por arco submerso, adaptado de [4].....	3
Figura 3: Efeito da polaridade no formato do cordão de solda [1].....	4
Figura 4: Representação gráfica da onda em CA: (a) senoidal, (b) quadrada; adaptado de [1].....	11
Figura 5: Representação gráfica dos parâmetros da onda quadrada.	12
Figura 6: Formato do cordão de solda em função do balanço, adaptado de [11].	16
Figura 7: Movimento típico do metal fundido no interior da poça de fusão na soldagem por arco submerso [12].	17
Figura 8: Diagrama de Schaeffler [14].....	18
Figura 9: Diagrama WRC-1992 [17].	19
Figura 10: Regiões das famílias de aços inoxidáveis, no diagrama Schaeffler, em função de sua microestrutura predominante [19] <i>apud</i> [20].	20
Figura 11: Relação dos modos de solidificação no diagrama de fases pseudobinário [13].....	30
Figura 12: Modos de solidificação dos aços austeníticos: (a) austenítico com ferrita interdendrítica; (b) reação peritética; (c) ferrítica transformando ferrita em austenita no estado sólido [6].	30
Figura 13: Efeito do modo de solidificação no formato do contorno de grão: (a) solidificação austenítica; (b) solidificação ferrítica-austenítica [13].	31
Figura 14: Modelo geral de dois estágios de reação para soldagem a arco [23].	33

Figura 15: Diagrama esquemático apresentando as duas regiões da poça de fusão: (a) seção longitudinal da soldagem; (b) seção transversal A-A [23].	34
Figura 16: Concentração de oxigênio no metal de solda em função do índice de basicidade [23, 25].	35
Figura 17: Reações eletroquímicas na soldagem: (a) polaridade CCPD(+); (b) CCPR(-).	40
Figura 18: Corpo de prova (<i>weld pad</i>) para análise química do metal de solda [27].	42
Figura 19: Equipamentos utilizados para a soldagem: (a) fonte de alimentação; (b) controlador.	44
Figura 20: Quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda obtido na soldagem com o eletrodo ER308L.	50
Figura 21: Quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda obtido na soldagem com o eletrodo ER309L.	50
Figura 22: Quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda obtido na soldagem com o eletrodo ER2209.	51
Figura 23: Quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda obtido na soldagem com o eletrodo ER2594.	51
Figura 24: Representação gráfica dos resultados: (a) diagrama de <i>Schaeffler</i> ; (b) diagrama WRC-1992.	52
Figura 25: Valor calculado do número equivalente de resistência ao pite (PREN)...	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da chapa (%).....	42
Tabela 2: Composição química dos eletrodos.	43
Tabela 3: Parâmetros de soldagem.	45
Tabela 4: Composição química dos metais de solda obtidos a partir da soldagem com eletrodo ER308L.....	47
Tabela 5: Composição química dos metais de solda obtidos a partir da soldagem com eletrodo ER309L.....	48
Tabela 6: Composição química dos metais de solda obtidos a partir da soldagem com eletrodo ER2209.....	48
Tabela 7: Composição química dos metais de solda obtidos a partir da soldagem com eletrodo ER2594.....	49
Tabela 8: Cálculo do cromo equivalente e do níquel equivalente conforme diagrama <i>Schaeffler</i> e WRC-1992.....	49
Tabela 9: Avaliação qualitativa da variação do teor de cada elemento com o aumento do balanço.	53
Tabela 10: Resultado do cálculo da razão Cr_{eq}/Ni_{eq} e do número equivalente de resistência à pites.	56
Tabela 11: Valores de ferrita previstos pelos diagramas <i>Schaeffler</i> e WRC-1992 e medidos pelo ferritoscópio.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	Aço Inoxidável
AIA	Aço Inoxidável Austenítico
AID	Aço Inoxidável Duplex
AOD	Descarburação com Oxigênio e Argônio
AS	Arco Submerso
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCC	Cúbico de Corpo Centrado
CCPD(-)	Corrente Contínua Polaridade Direta (Eletrodo Negativo)
CCPR(+)	Corrente Contínua Polaridade Reversa (Eletrodo Positivo)
CFC	Cúbico de Face Centrada
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EPD	Estado Plano de Deformações
EPT	Estado Plano de Tensões
MB	Metal de Base
MS	Metal de Solda
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
SUMÁRIO	xiii
INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1. Soldagem por Arco Submerso.....	2
1.1. Introdução	2
1.2. Eletrodos	4
1.3. Fluxos.....	5
1.3.1. Fluxos Fundidos	5
1.3.2. Fluxos Aglomerados	5
1.3.3. Composição Química	6
1.4. Variáveis do Processo.....	7
1.4.1. Tensão do Arco	7

1.4.2. Corrente Elétrica	8
1.4.3. Polaridade do Eletrodo	8
1.4.4. Diâmetro do Eletrodo	9
1.4.5. Distância Tubo de Contato – Peça	9
1.4.6. Velocidade de Soldagem	10
1.5. Onda Quadrada	10
1.6. Fluxo no Interior da Poça de Fusão	17
2. Aços Inoxidáveis	18
2.1. Aços Inoxidáveis Martensíticos	21
2.2. Aços Inoxidáveis Ferríticos	22
2.3. Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação	22
2.4. Aços Inoxidáveis Austeníticos	23
2.5. Aços Inoxidáveis Duplex	26
2.6. Modos de Solidificação	29
3. Reações Químicas na Soldagem	32
3.1. Reações Termoquímicas	32
3.1.1. Reações Gás-Metal	34
3.1.2. Reações Escória-Metal	37
3.2. Reações Eletroquímicas	39
MATERIAIS E MÉTODOS	41
1. Introdução	41

2. Materiais	42
2.1. Corpos de Prova (<i>Weld Pads</i>).....	42
2.2. Metal de Base	42
2.3. Consumíveis.....	43
3. Soldagem.....	44
3.1. Equipamentos	44
3.2. Procedimento	44
4. Ensaios	46
4.1. Análises Químicas.....	46
4.2. Medição de Ferrita- δ com Ferritoscópio.....	46
RESULTADOS E ANÁLISES	47
1. Resultado das Análises Químicas	47
2. Modo de Solidificação e Número Equivalente de Resistência a Pite	55
3. Medição de Ferrita- δ	56
CONCLUSÕES	58
TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICE A – Análise dos Dados de Composição Química	64
APÊNDICE B – Gráficos da Variação da Composição Química (%)	68

INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho é investigar os efeitos do balanço de onda, da soldagem por arco submerso com onda quadrada, na composição química do metal de solda de aços inoxidáveis austeníticos e duplex, utilizando diferentes metais de adição. Para, desta forma, determinar qual a razão entre os ciclos que possibilita minimizar a quantidade de elementos indesejados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. Soldagem por Arco Submerso

1.1. Introdução

O processo de soldagem utilizando arame nu e fluxo granular data de 1935, tendo sido sua utilização popularizada entre os anos de 1939 e 1945, devido à demanda reduzir o tempo disponível para a produção dos equipamentos soldados [1].

A união é realizada pela fusão do metal base e dos consumíveis por um arco elétrico criado entre o eletrodo e a peça. O eletrodo de arame nu é fornecido por um alimentador através do bocal de contato, conectado à fonte de energia; e o fluxo é depositado à frente do arame [2, 3], como mostra a figura 1.

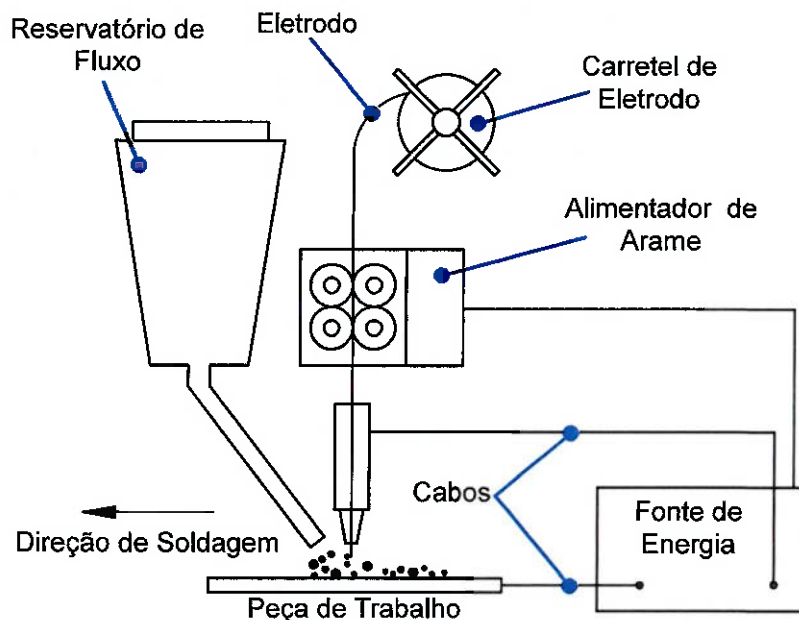


Figura 1: Esquema do equipamento da soldagem por arco submerso [2].

A energia necessária para a criação da junta é proveniente de um arco elétrico entre o eletrodo de metal nu e o metal de base, conectados a uma fonte de energia. O arco se estabiliza entre uma camada de escória fundida e a poça de fusão, como

mostra a figura 2 [4], essa cavidade é preenchida de gases, como o CO_2 e o CO , e fumos metálicos [5], não necessitando de gás de proteção [2]. Durante a soldagem, o arco funde uma parcela do fluxo juntamente com a ponta do eletrodo [3]; A transferência de massa se dá quase que exclusivamente por força de Lorenz [4], de origem eletromagnética.

As propriedades mecânicas da união soldada por arco submerso dependem da composição química e da microestrutura do metal de solda; ou seja, do eletrodo, do fluxo e da diluição do metal base, bem como da taxa de resfriamento. Sendo, assim, necessário levar em consideração a compatibilidade metalúrgica da combinação do eletrodo com o fluxo para o metal base a ser soldado, sua diluição e o aporte térmico [4].

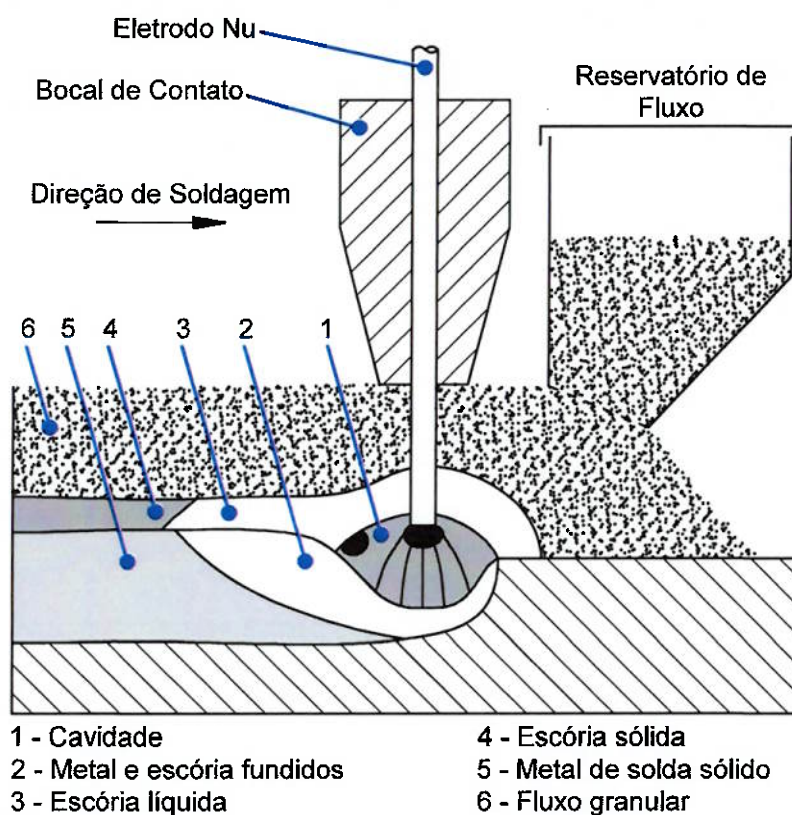


Figura 2: Funcionamento da soldagem por arco submerso, adaptado de [4].

A soldagem pode ser feita tanto utilizando fonte de corrente contínua (CC) como de corrente alternada (CA). Para a maioria das aplicações utiliza-se corrente contínua de polaridade reversa CCPR(+), que confere uma maior penetração e um melhor formato da poça de fusão; para algumas aplicações, como soldagem de revestimento, a corrente contínua de polaridade direta CCPD(-) é utilizada, por propiciar uma maior taxa de deposição e menor penetração; o efeito da polaridade da corrente é ilustrado na figura 3. Em alguns casos, como a soldagem com múltiplos arcos ou na ocorrência de sopro magnético, é utilizada a corrente alternada, que tem parte do seu ciclo em polaridade reversa e parte em polaridade direta, combinando, dessa forma, características de ambas [1, 3].

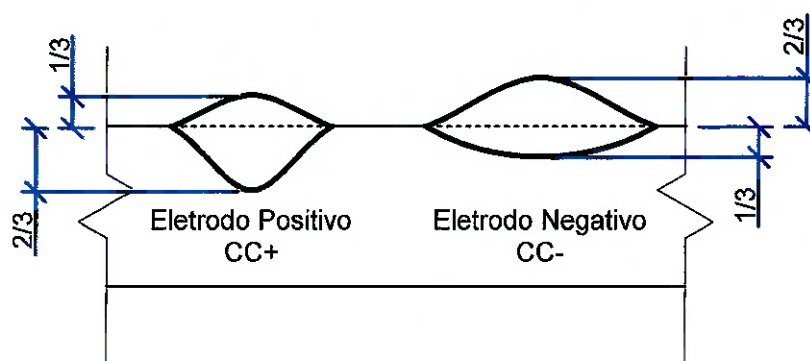


Figura 3: Efeito da polaridade no formato do cordão de solda [1].

1.2. Eletrodos

Na soldagem por arco submerso os eletrodos são responsáveis pela condução da corrente elétrica e por fornecer metal de adição para o preenchimento da junta, sendo utilizado na forma de arame através de um alimentador automático.

A escolha do eletrodo depende de sua composição química, que deve ser compatível com a do metal base. Com o objetivo de aumentar a resistência à oxidação atmosférica e melhorar a transferência de corrente, os arames costumam ser cobreados [1, 4].

As quantidades de manganês e silício no metal de adição devem ser controladas, pois podem tornar a solda suscetível à trinca de solidificação e reduzir a estabilidade do arco, respectivamente. Para garantir a qualidade da junta soldada, o eletrodo deve ser cuidadosamente enrolado nas bobinas, para não danificar a cobertura de cobre e manter sua seção perfeitamente circular; e deve estar livre de gorduras [4].

1.3. Fluxos

Na soldagem por arco submerso utiliza-se um fluxo, que é um composto em forma de pó depositado logo a frente do arco, este fluxo funde formando uma bolha, na escória líquida, que estoura e se recria periodicamente [6].

O fluxo é responsável por proteger o metal fundido do ar atmosférico, desoxidar a poça de fusão e agir como isolante térmico; pode ser utilizado, também, para modificar a composição química do metal de solda para aumentar a taxa de deposição, através da adição de metal em pó [1, 3]. Eles podem ser divididos, por seu modo de fabricação, em duas categorias: fundidos e aglomerados [1].

1.3.1. Fluxos Fundidos

Estes fluxos são formados de compostos minerais como, por exemplo, óxidos de manganês, silício, alumínio, fundidos para formar vidro metálico, depois são moídos até a granulometria desejada. Eles possuem boa homogeneidade e não são higroscópicos.

1.3.2. Fluxos Aglomerados

Os fluxos desta categoria têm composição química semelhante aos fluxos fundidos; entretanto, após serem moídos, eles são agregados com um agente aglomerante e sinterizados.

1.3.3. Composição Química

De acordo com *Schulze* [4], a partir do conhecimento da composição metalúrgica do fluxo granular é possível prever as propriedades mecânicas e a composição química do metal de solda.

Segundo *Messler* [7], os fluxos podem ser compostos por haletos, que são adequados à soldagem de ligas de titânio ou alumínio; por uma mistura de óxidos e haletos, que é adequada à soldagem de aços baixa liga; ou unicamente por óxidos.

Os fluxos livres de haletos são classificados em ácidos, básicos, semibásicos ou neutros [6, 7]. A basicidade pode ser calculada conforme a equação da *Tuliani, Boniszewski e Eaton* [6], na qual os valores são expressos em porcentagem de massa:

$$BI = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + K_2O + Na_2O + 0,5 \cdot (MnO + FeO)}{SiO_2 + 0,5 \cdot (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad (1)$$

Outra forma de determinar a basicidade do fluxo é através da equação de *Mori* [4, 6, 7], na qual os valores são expressos em fração molar:

$$BL = 6,05 \cdot CaO + 4,8 \cdot MnO + 4,0 \cdot MgO + 3,4 \cdot FeO - 6,31 \cdot SiO_2 - 4,97 \cdot TiO_2 - 0,2 \cdot ZrO_2 \quad (2)$$

Para a equação (1), o fluxo é classificado como ácido quando $BI < 1$, neutro quando $1 \leq BI < 1,5$, semibásico quando $1,5 \leq BI < 2,5$ e básico quando $BI \geq 2,5$ [6]. Já para a equação (2), o fluxo é básico ácido para $BL < 0$, neutro para $BL = 0$ e básico quando $BL > 0$ [4, 6].

Os fluxos podem ser classificados também quanto ao seu grau de influência na composição química do metal de solda. Eles são denominados neutros, quando não produzem alterações significativas na composição do MS [6, 8]; ativos quando

possuem grandes quantidades de manganês e silício, que aumentam a robustez contra trincas e porosidade [8]; e ligados, quando, além de elevados teores de Mn e Si possuem elementos de liga [8].

1.4. Variáveis do Processo

Deve-se considerar uma série de parâmetros para garantir as propriedades mecânicas e metalúrgicas desejadas na junta soldada, estas variáveis determinam as dimensões da poça de fusão, penetração, trincamento, porosidade e composição química do metal de solda [5].

1.4.1. Tensão do Arco

A tensão elétrica do arco, juntamente com a velocidade de soldagem, é responsável pelo formato da seção transversal do cordão de solda. Aumentando sua magnitude obtém-se um cordão mais largo; entretanto, uma elevação excessiva pode levar a um cordão com seção transversal em forma de chapéu, que é sensível à trincas [1, 5]. Além disso, haverá um aumento na diluição do metal de base; entretanto, sem afetar a penetração [5].

Uma tensão mais elevada aumenta a robustez a porosidades causadas por contaminantes não removidos; também causa o aumento do consumo de fluxo, bem como do teor de elementos de liga proveniente do fluxo. Essa variável está ligada, também, ao comprimento do arco e sua energia [1, 5].

No caso da tensão estar excessivamente baixa a poça de fusão será muito rasa, tornando difícil a remoção da escória efetivamente [3].

1.4.2. Corrente Elétrica

A corrente na soldagem por arco submerso determina a taxa de deposição e a penetração da solda [3, 5], desta forma ela deve ser escolhida dentro da faixa aceitável para o diâmetro do eletrodo [1]. A intensidade da corrente pode ser configurada através da dimensão do arame e sua velocidade de alimentação [3], para garantir uma densidade de corrente adequada.

A densidade de corrente determina a penetração do cordão de solda e, se for excessivamente baixa, causa a instabilidade do arco elétrico [5].

1.4.3. Polaridade do Eletrodo

Para a soldagem por AS, pode-se optar por utilizar tanto CCPR(+) quanto CCPD(-), além dessas, pode-se utilizar corrente alternada (CA).

A CCPR(+) é a utilizada na grande maioria das soldagens por AS [1], pois ela proporciona uma maior penetração, uma melhor aparência do cordão e do formato da poça de fusão, bem como aumenta a resistência à porosidade.

Já a CCPD(-) tem uma taxa de deposição maior, cerca de 30% a 35%, pelo fato da região mais quente do arco ficar próxima da ponta do eletrodo. Para obter um cordão com formato semelhante à CCPR(+), deve-se aumentar a tensão do arco elétrico [1, 5].

Pode-se optar, também, por utilizar CA para a soldagem, que possui taxa de deposição e penetração intermediárias em relação à CCPR(+) e CCPD(-). Geralmente ela é utilizada para casos especiais, como múltiplos arames ou quando há incidência de sopro magnético [1, 5].

1.4.4. Diâmetro do Eletrodo

O diâmetro do eletrodo determina a densidade de corrente, além disso, um aumento na sua dimensão irá ocasionar um aumento na largura do cordão e uma diminuição da penetração e da taxa de deposição. Um acréscimo exagerado irá tornar difícil a abertura do arco, bem como reduzirá sua estabilidade [1, 5].

1.4.5. Distância Tubo de Contato – Peça

Também conhecido como extensão do eletrodo, este parâmetro é a distância entre o ponto de contato elétrico e a ponta do eletrodo [1]; um aumento desta variável incrementa a taxa de deposição e diminui a penetração [5], devido ao pré-aquecimento do arame causado pela passagem de corrente, como mostra a equação (3).

$$\begin{aligned}P &= R \cdot I^2 \\R &= \rho \cdot \frac{L}{A} \\P &= \rho \cdot \frac{L}{A} \cdot I^2\end{aligned}\tag{3}$$

Onde:

- P : potência de pré-aquecimento;
- R : resistência do eletrodo;
- I : corrente elétrica;
- ρ : resistividade do arame;
- L : distância tubo de contato – peça;
- A : seção transversal do eletrodo.

1.4.6. Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é responsável pelo tamanho do cordão e sua penetração [1]. Um aumento em sua magnitude ocasiona a diminuição da penetração e da largura da poça de fusão [5].

Quando este parâmetro está excessivamente alto, ele causa mordeduras, apagamento do arco, porosidade e trincas. Entretanto, quando muito baixo, forma cordões em forma de chapéu que é sujeito a trincas.

1.5. Onda Quadrada

A soldagem utilizando corrente alternada puramente senoidal apresenta o inconveniente de, quando a amplitude da tensão está abaixo da tensão da coluna de plasma, o arco elétrico é temporariamente extinto [1], como apresenta a figura 4 (a), na qual o autor apresenta utilização de CA senoidal na soldagem TIG.

Pode-se observar que o aumento na magnitude de tensão reduz o tempo de arco apagado; entretanto, não é possível aumentar a tensão indefinidamente. Assim, como a transição entre os ciclos positivos e negativos na onda quadrada é teoricamente instantânea, o tempo de extinção do arco elétrico tende a zero, como se observa na figura 4 (b).

A figura 5 ilustra as propriedades presentes num sinal com forma de onda quadrada. A partir dele pode-se notar que uma onda quadrada é descrita em função de sua amplitude, seu período ou frequência, balanço e desvio de tensão (*offset*).

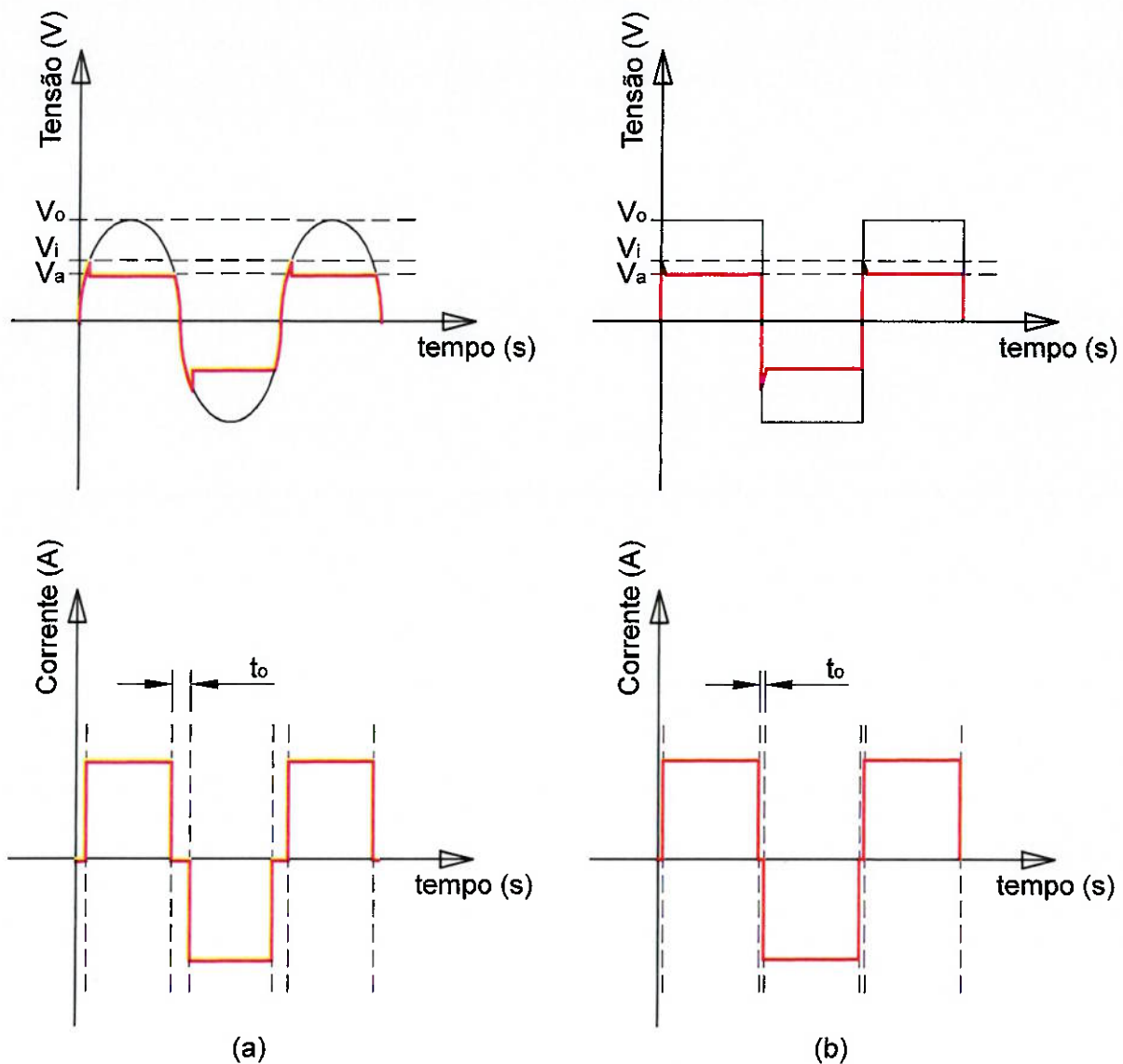


Figura 4: Representação gráfica da onda em CA: (a) senoidal, (b) quadrada; adaptado de [1].

Onde:

- V_0 : tensão em vazio;
- V_i : tensão de abertura do arco;
- V_a : tensão do arco;
- t_0 : tempo de extinção do arco.

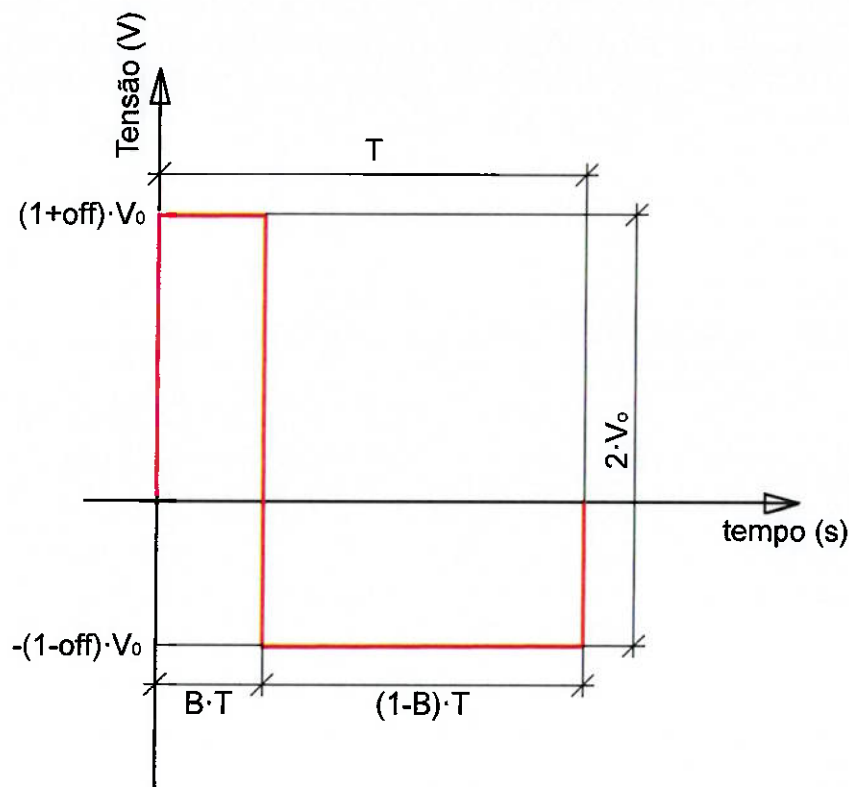


Figura 5: Representação gráfica dos parâmetros da onda quadrada.

Onde:

- V_0 : Amplitude (V);
- T : Período (s);
- $f = \frac{1}{T}$: Frequência (Hz);
- B : Balanço (%);
- off : Desvio de tensão (*Offset*, %).

A amplitude determina a magnitude da onda; o período é o tempo para uma revolução completa; a frequência demonstra quantas vezes a forma de onda se repete por segundo; o balanço representa a taxa que o sinal fica no ciclo positivo; e o desvio de tensão (*offset*) define a diferença da amplitude dos ciclos positivos e negativos.

A potência em um elemento de um circuito elétrico, num determinado momento, é o produto da tensão instantânea $v(t)$ pela corrente instantânea $i(t)$. Esta grandeza geralmente muda com o tempo, sendo mais fácil lidar com a potência média [9], que é dada pela equação (4):

$$\overline{P} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (4)$$

Ao lidar com circuitos elétricos em corrente alternada, é interessante expressar a corrente e a tensão elétrica em termos que representem a potência efetivamente entregue à carga, esse é o conceito de valores efetivos. Isso significa que o *valor efetivo* da corrente de um sinal periódico é a corrente constante que fornece a mesma energia média a um resistor [9].

Esse valor pode ser calculado pelo valor quadrático médio (RMS), para qualquer função periódica $x(t)$ o valor RMS pode ser calculado pela equação (5):

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2(t) \cdot dt} \quad (5)$$

O produto da corrente efetiva com a tensão efetiva é conhecido como potência aparente ($S = I_{RMS} \cdot V_{RMS}$) [9]. Assim, outra grandeza de interesse é o *fator de potência (FP)*, que é definido como a razão entre a potência média e a potência aparente [9, 10], como mostra a equação (6).

$$FP = \frac{\overline{P}}{S} = \left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \right) \cdot (I_{RMS} \cdot V_{RMS})^{-1} \quad (6)$$

Desta forma, a partir das figuras 4 e da 5, supondo um desvio de tensão (*offset*) de 0% e que $V_i \approx V_a$, tem-se que:

$$v(t) = \begin{cases} Va, & 0 < t < B \cdot T \\ -Va, & B \cdot T < t < T \end{cases} \quad i(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t < t_0 \\ I_0, & t_0 < t < B \cdot T \\ 0, & B \cdot T < t < B \cdot T + t_0 \\ -I_0, & B \cdot T + t_0 < t < T \end{cases}$$

Onde Va é a tensão do arco, I_0 é a corrente de soldagem, B é o balanço da onda, T é o período de um ciclo completo e t_0 é o tempo de arco apagado. Com isso, pode-se calcular a potência média:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \cdot \left[\int_0^{t_0} v(t) i(t) dt + \int_{t_0}^{B \cdot T} v(t) i(t) dt + \int_{B \cdot T}^{B \cdot T + t_0} v(t) i(t) dt + \int_{B \cdot T + t_0}^T v(t) i(t) dt \right] \\ &= \frac{1}{T} \cdot [0 + Va \cdot I_0 (B \cdot T - t_0) + 0 + Va \cdot I_0 (T - B \cdot T - t_0)] \\ \therefore \bar{P} &= Va \cdot I_0 \cdot \left(\frac{T - 2 \cdot t_0}{T} \right) \end{aligned}$$

Calculando-se o valor efetivo da tensão, tem-se:

$$\begin{aligned} V_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left[\int_0^{B \cdot T} v^2(t) dt + \int_{B \cdot T}^T v^2(t) dt \right]} \\ &= \sqrt{\frac{Va^2}{T} \cdot [(B \cdot T - 0) + (T - B \cdot T)]} \Rightarrow V_{RMS} = Va \end{aligned}$$

E o valor efetivo da corrente:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left[\int_0^{t_0} i^2(t) dt + \int_{t_0}^{B \cdot T} i^2(t) dt + \int_{B \cdot T}^{B \cdot T + t_0} i^2(t) dt + \int_{B \cdot T + t_0}^T i^2(t) dt \right]} \\
&= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot [0 + I_0^2(B \cdot T - t_0) + 0 + I_0^2(T - B \cdot T - t_0)]} \Rightarrow I_{RMS} = I_0 \cdot \sqrt{\frac{T - 2 \cdot t_0}{T}}
\end{aligned}$$

Desta forma, tem-se que o fator de potência:

$$FP = \frac{\bar{P}}{S} = \frac{V_a \cdot I_0 \cdot \left(\frac{T - 2 \cdot t_0}{T} \right)}{V_a \cdot I_0 \cdot \sqrt{\frac{T - 2 \cdot t_0}{T}}} \Rightarrow FP = \sqrt{\frac{T - 2 \cdot t_0}{T}}$$

Isso indica que o valor do balanço da onda quadrada não interfere na transferência de energia quando o desvio de tensão (*offset*) é de 0 %. E, como o intervalo de arco apagado t_0 é muito pequeno, o fator de potência é praticamente 1,00.

Calculando a potência média apenas para o ciclo positivo tem-se:

$$\begin{aligned}
\bar{P}(+) &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{B \cdot T} V_a \cdot I_0 dt \\
\therefore \bar{P}(+) &= V_a \cdot I_0 \cdot \left(B - \frac{t_0}{T} \right)
\end{aligned} \tag{7}$$

E, para o ciclo negativo:

$$\begin{aligned}
\bar{P}(-) &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{B \cdot T + t_0}^T V_a \cdot I_0 dt \\
\therefore \bar{P}(-) &= V_a \cdot I_0 \cdot \left[(1 - B) - \frac{t_0}{T} \right]
\end{aligned} \tag{8}$$

Como $t_0 \ll T$ tem-se que, pelas equações (7) e (8), que a fração de energia fornecida por cada um dos ciclos depende somente do balanço.

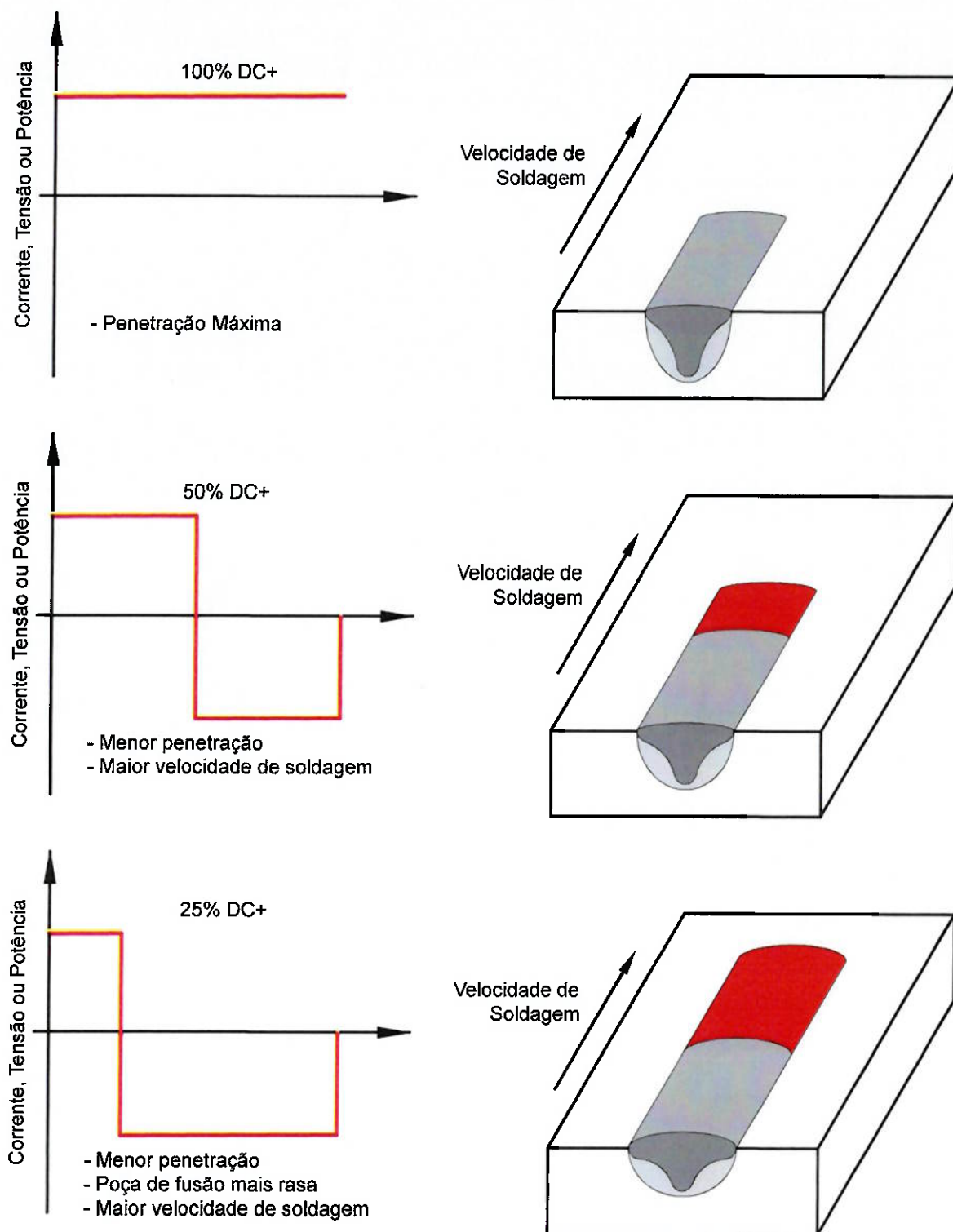


Figura 6: Formato do cordão de solda em função do balanço, adaptado de [11].

Assim, quanto maior o balanço maior o tempo de atuação do ciclo de polaridade CCPR(+) e, desta forma, maior a penetração e menor a taxa de deposição, como ilustra a figura 6. Além disso, como é mostrado mais adiante, maior deverá ser a

influência das *reações de oxidação anódica* no metal de solda, que ocorrem no metal fundido na ponta do eletrodo.

1.6. Fluxo no Interior da Poça de Fusão

Como é apresentado por *Lancaster* [12], durante a soldagem por arco submerso é formada uma depressão na parte frontal da poça de fusão, o metal fundido flui por baixo e pelas laterais dessa depressão; na parte traseira da poça o fluxo inverte e o metal flui pela superfície. O formato da poça de fusão na soldagem por AS é bem alongado se comparado a outros processos. A figura 7 ilustra esse fenômeno.

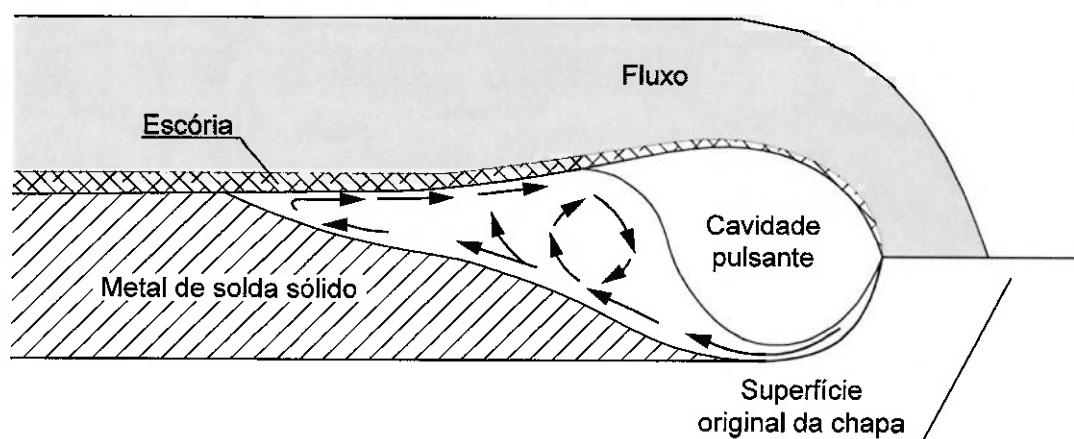


Figura 7: Movimento típico do metal fundido no interior da poça de fusão na soldagem por arco submerso [12].

2. Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis (AI) são ligas de ferro com elevado teor de cromo, no mínimo 10,5% em massa [13], criando assim uma película de óxido que irá passivar o metal, protegendo da corrosão do meio. A utilização de níquel nesses metais é, também, muito importante, para a modificação de sua microestrutura.

Através do diagrama de Schaeffler, apresentado na figura 8, é possível prever a microestrutura presente em uma liga Fe-Cr-Ni no estado *como solidificado* em temperatura ambiente [14], que é o caso do metal de solda. Para o cálculo do cromo e do níquel equivalentes, são utilizadas as equações (9) e (10).

$$Cr_{eq} = Cr + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (9)$$

$$Ni_{eq} = Ni + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb \quad (10)$$

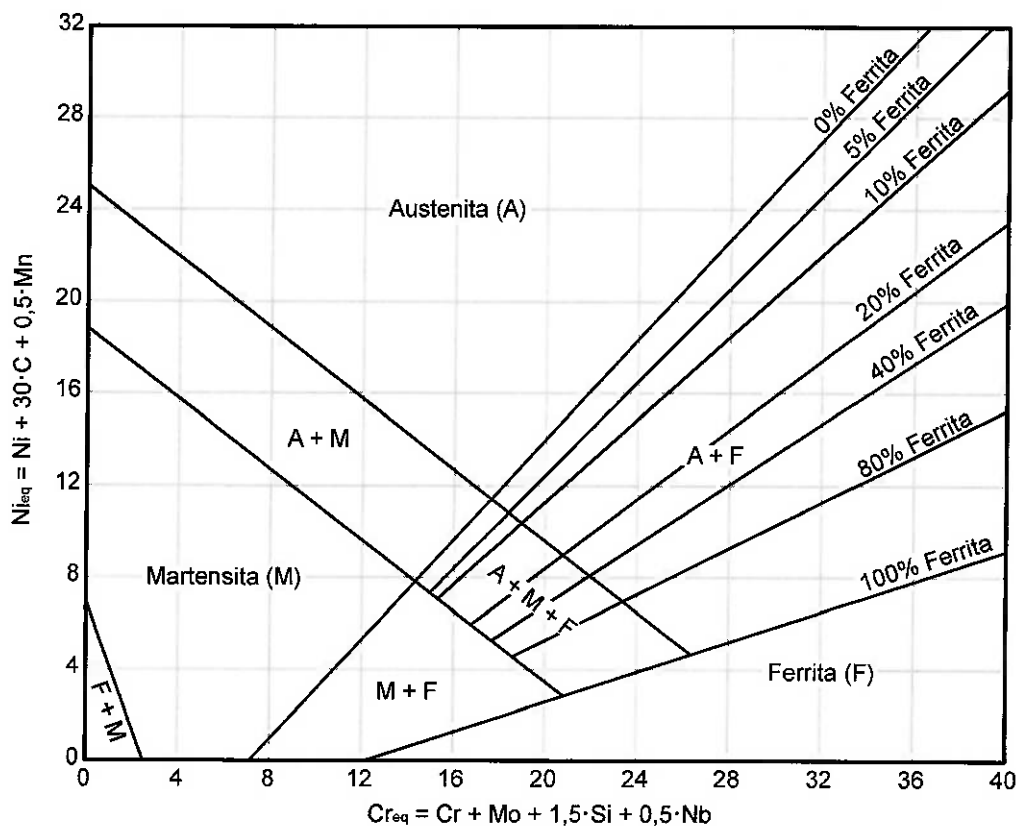


Figura 8: Diagrama de Schaeffler [14].

A capacidade de prever e controlar a quantidade de ferrita- δ no metal de solda dos aços inoxidáveis austeníticos é de extrema importância, pois ela determina várias propriedades da junta soldada, como o comportamento a altas temperaturas e a resistência à corrosão [15, 16].

Diversos pesquisadores se dedicaram a desenvolver metodologias mais refinadas para a predição do conteúdo de ferrita- δ no MS, devido à sua grande influência nas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão [15, 16].

Em 1956 foi publicado o diagrama de *DeLong*, que foi desenvolvido para a família 300 de aços inoxidáveis [13]. Ele apresentava uma maior precisão na previsão do conteúdo de ferrita- δ , relacionando-a com as medições magnéticas e apresentando no diagrama o *número de ferrita* (FN) [6, 13]. Além disso ele considerava também a influência do nitrogênio no níquel equivalente.

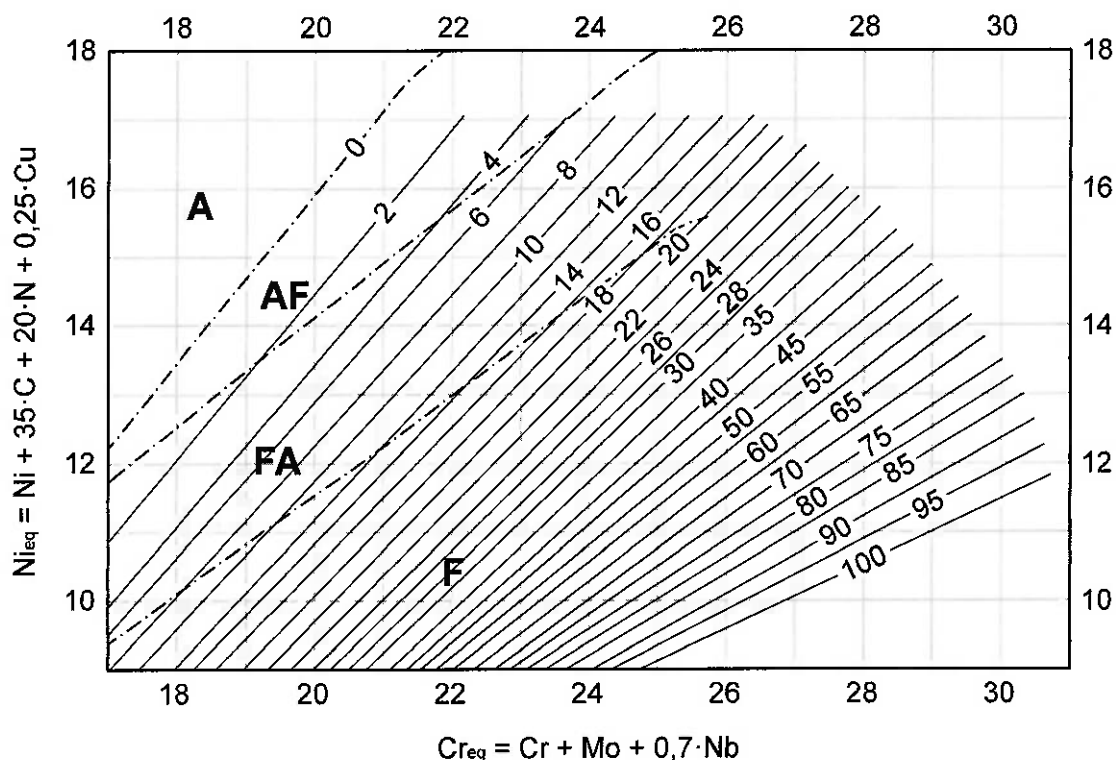


Figura 9: Diagrama WRC-1992 [17].

Nos anos 80 foi realizado um trabalho, pela *Welding Research Council* (WRC), para melhorar e expandir os diagramas de *Schaeffler* e de *DeLong* [13], em 1988 foi publicado por *Siewert et al.* [18] o diagrama WRC-1988, que expandia a escala do FN para 0 – 100 além de apresentar os modos de solidificação [13].

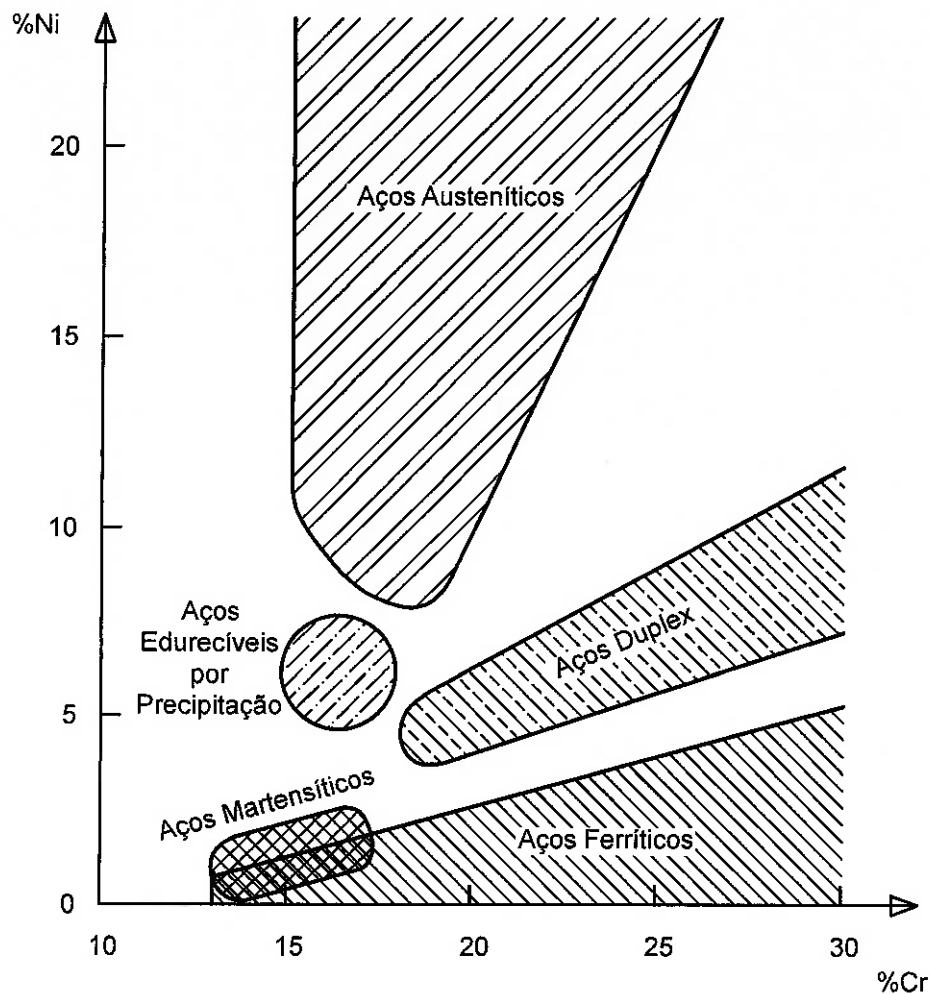


Figura 10: Regiões das famílias de aços inoxidáveis, no diagrama Schaeffler, em função de sua microestrutura predominante [19] *apud* [20].

Finalmente em 1994 o diagrama WRC-1992 desenvolvido por *Kotecki* e *Siewert* [17] substituiu o diagrama de *DeLong* na norma ASME III, sendo válido atualmente para aços inoxidáveis austeníticos e duplex [13, 16], a figura 9 apresenta esse diagrama.

Nesta metodologia, foi adicionado um coeficiente para o cobre no cálculo do níquel equivalente, desta forma, o cromo equivalente e o níquel equivalente são calculados pelas equações (11) e (12), respectivamente.

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7 \cdot Nb \quad (11)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35 \cdot C + 20 \cdot N + 0,25 \cdot Cu \quad (12)$$

Os aços inoxidáveis são classificados em cinco famílias: martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex e endurecíveis por precipitação; essa classificação é feita com base nas fases metalúrgicas predominantes. A figura 10 apresenta as regiões de cada um dos grupos de aços inoxidáveis em função da sua concentração de níquel e cromo.

2.1. Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são do sistema ternário Fe-Cr-C [13], e têm a martensita de estrutura *cúbica de corpo centrado* (CCC) como fase metalúrgica predominante. A martensita é basicamente ferrita formada com altas quantidades de carbono [14].

Nestas ligas, a martensita é formada a partir da austenita. Isso ocorre simplesmente porque a ferrita tem uma energia menor que a austenita, e essa diferença de potencial aumenta conforme a temperatura diminui [14, 13].

Esses metais têm uma baixa resistência à corrosão, em comparação com as demais famílias, pois possuem uma concentração de cromo relativamente pequena e grandes quantidades de carbono e, devido à formação de carbeto de cromo, a taxa de cromo efetivo diminui ainda mais [14].

2.2. Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem como sua fase principal a ferrita de estrutura CCC, estes metais são utilizados em aplicações onde a resistência a corrosão é mais importante que propriedades mecânicas [13]. Embora tenham maior resistência à corrosão que os martensíticos e os austeníticos, sua ductilidade é menor que a dos últimos [14].

As primeiras ligas ferríticas desenvolvidas possuem alto teor de carbono em sua composição, o que as torna mais difícil de soldar, pois não são totalmente ferríticas. Durante a soldagem pode haver a formação de austenita a alta temperatura que se transforma em martensita, fragilizando o metal de solda na condição de “*como soldado*” [14].

As ligas mais modernas possuem teor de carbono muito menor, devido ao processo de *descarburação com oxigênio e argônio (AOD)*. Estes metais são ferríticos a qualquer temperatura, possuindo assim uma melhor soldabilidade [14].

O cromo é o principal elemento que promove a formação de ferrita, entretanto outros elementos também auxiliam a formação dessa fase. Carbono e nitrogênio são considerados impurezas e, como sua solubilidade em fase *cúbica de face centrada (CFC)* é muito maior, eles devem ser eliminados para garantir a formação da ferrita [14].

2.3. Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são desenvolvidos de tal forma que, durante o tratamento térmico, haja uma formação de precipitados finos [13], conferindo assim sua dureza. Eles podem ter microestrutura predominante martensítica, semiaustenítica ou austenítica [13, 14].

Acreditou-se por muito tempo que somente era possível obter aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação com microestrutura martensítica ou ferrítica, entretanto, foi demonstrado mais tarde que era possível obter ligas dessa família também com microestrutura austenítica [13].

As ligas dessa família com microestrutura martensítica são produzidas, geralmente, como barras forjadas ou em outras formas de trabalhadas a quente, já as semiausteníticas são melhores para produção de chapas, fitas e arames [14].

Esses metais podem ter resistência à tração muito alta, em alguns caso acima de 1520 MPa [13], e sua resistência aproxima-se à do aço austenítico AISI 304 [13, 14]. Deve-se tomar cuidado com o tratamento térmico, pois pode comprometer a resistência à corrosão [13].

2.4. Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos (AIA) recebem essa denominação pelo fato da sua fase metalúrgica predominante ser a austenita (γ) de estrutura CFC [14, 21], o que confere um comportamento tenaz e dúctil em temperaturas até o zero absoluto [14], tornando esta família de metais adequada para aplicações criogênicas.

As ligas pertencentes a essa classe apresentam boa resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas [13], embora o limite à fadiga seja relativamente baixo se comparado às ferríticas [14], cerca de 30% do limite de tração.

O principal elemento austenitizante é o níquel, que está presente em grandes quantidades, acima de 8% em massa, nos aços inoxidáveis austeníticos [13]. Além dele, o nitrogênio, o carbono e o cobre também colaboram para a formação da austenita à temperatura ambiente.

A austenita é formada devido à alta concentração de elementos de liga austenitizantes, como Ni, C, N, Mn e Cu [6, 13, 21], na composição do metal. Quando adicionados elementos ferritizantes, como Cr, Mo, Si, Nb e Al [6], para modificar algumas propriedades da liga, deve-se aumentar também a concentração de elementos austenitizantes [14], para manter a fase metalúrgica predominante.

Como nas demais famílias de aços inoxidáveis, a proteção à corrosão é conferida pela formação de uma película superficial autorregenerante de óxido de cromo [6]. Entretanto, devido a seu maior coeficiente de expansão térmica, as ligas austeníticas possuem uma resistência à corrosão menor que as ferríticas [14], causada pela ruptura do filme passivador.

Segundo Lancaster [6], as propriedades mecânicas das ligas de AIA sujeitas a temperaturas *subzero* dependem das concentrações de C, Cr, Ni, O e ferrita. O carbono e o cromo reduzem a tenacidade por interferir na coalescência das microcavidades e pela precipitação de carbeto, respectivamente; já o níquel aumenta a energia absorvida; e o oxigênio e a ferrita normalmente reduz a tenacidade.

Além disso, as ligas de AIA que possuem austenita menos estável estão sujeitas a formação de martensita (α' e ϵ) quando sujeitas a deformações e a temperaturas criogênicas [6, 14], sendo essas fases susceptíveis à clivagem.

De forma geral, os AIA aceitam qualquer processo de soldagem [13, 14], mas é necessário tomar alguns cuidados para evitar problemas como trinca de solidificação, sensibilização e precipitação de carbeto e de fases intermetálicas.

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem uma baixa condutividade térmica combinada com uma alta dilatação térmica, que pode resultar em uma maior tensão residual e, eventualmente, trinca de solidificação [13, 14].

Eles também estão sujeitos à precipitação de carbeto de cromo na zona afetada pelo calor (ZAC), causando a sensitização, que é a redução da resistência à corrosão localizada [13, 14]. Antes do advento da AOD, a sensitização era evitada unicamente pela estabilização da austenita com Ti ou Nb, mas atualmente ligas com baixos teores de carbono são utilizadas para reduzir a sensitização através da eliminação da supersaturação de C [14].

McGuire [14] apresenta ainda outros problemas relacionados a soldagem dos AIA, como: precipitação de fases intermetálicas e microsegregação, que afetam a tenacidade e a resistência a corrosão; e a oxidação de cromo na soldagem devido ao aporte térmico, que reduz a concentração de Cr deixando a área susceptível à corrosão por pites. Esses problemas podem ser evitados pelo controle do ciclo térmico e da proteção da poça de fusão.

A composição do metal de adição AISI 308 tem conteúdo de cromo e níquel 21 % e 19 %, respectivamente, ela é utilizada para soldagem similar, em especial do tipo 304 [22]. Sua microestrutura é de matriz austenítica com fase ferrita- δ rica em alumínio [13].

A liga AISI 309 possui conteúdo nominal de Cr 24 % e Ni 13 %, ela é utilizada principalmente para soldagem similar de aços inoxidáveis trabalhados e fundidos, mas pode ser utilizada também na soldagem de metais de base AISI 304 para ambientes corrosivos e juntas dissimilares de AISI 304 com aço carbono [13, 22].

O metal AISI 316 por sua vez, tem conteúdo nominal de 19 % de cromo, 12,5 % de níquel e de 2 a 3 % de molibdênio; ele é utilizado na soldagem de metais de base AISI 316 e similares, e para metais de base especiais para alta temperatura [22]. A adição do Mo aumenta a resistência à fluência, ao ataque transgranular e à corrosão por pites [13, 22]. Esta liga pode sofrer falha por corrosão transgranular sob tensão quando, simultaneamente, tiver uma rede de ferrita contínua ou semicontínua, a razão Cr/Mo for menor que 8,2:1, e estiver imersa em meio corrosivo [13, 22].

As ligas com baixa quantidade de carbono (AISI 308L, 309L e 316L) têm, no máximo, 0,03 % de C, o que reduz a precipitação de carbeto nos contornos dos grãos, não havendo a necessidade de Nb ou Ti para reduzir o risco de trinca de solidificação; por outro lado, elas não possuem a mesma resistência a alta temperatura que as anteriores. A liga AISI 316L, em especial, é utilizada primariamente para a soldagem de aços austeníticos baixo carbono contendo molibdênio [22].

2.5. Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex (AID) possuem tanto a ferrita como a austenita como fases predominantes, numa razão ideal de 1:1, sua microestrutura apresenta ilhas de austenita em uma matriz de ferrita altamente ligada, o que possibilita sua alta resistência pelo refino de grão [13, 14].

Os metais desta família apresentam altas concentrações de cromo, mais de 20% em massa, tornando-as muito resistentes à corrosão, mas inadequadas a aplicações de alta temperatura, devido à formação de fases frágeis [14]. Devido a sua baixa temperatura para a precipitação, ela é inapropriada para aplicações que necessitem de alívio térmico de tensões residuais [13]. Além disso, como possuem também

transição dúctil-frágil, também são inadequadas para aplicações a temperaturas criogênicas [13, 14]. Desta forma, sua utilização é limitada a uma faixa de -40°C a 280°C [13].

Estas ligas possuem excelente resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão, em especial quando expostas a meios agressivos [13, 14]. Seu limite de escoamento chega a ser maior que 425 MPa, muito superior às austeníticas, além de possuírem elevada dureza, sendo adequadas para aplicações que sofram abrasão [13].

Como o cromo tem mais afinidade com a ferrita, e de fato ele é um elemento ferritizante, o alto teor de Cr tende a levar o balanço ferrita/austenita a favor da primeira. Isso é amenizado pela adição de nitrogênio, que dissolve praticamente somente na austenita e, com isso, diminui a atividade do cromo aumentando sua concentração e, desta forma, melhorando a razão ferrita/austenita para todas as temperaturas [14].

Quando se lida com ambientes muito corrosivos, uma preocupação especial é a corrosão por pites, que é um ataque localizado criando furos profundos que compromete a integridade estrutural do equipamento [13]. Nos aços inoxidáveis a resistência a pites é, principalmente, em função da composição química, o que levou ao desenvolvimento de várias equações correlacionando-as [13, 14]. A mais popular é o número equivalente de resistência ao pite (*PREN*), apresentada pela equação (13).

$$PREN = Cr + 3,3 \cdot (Mo + 0,5 \cdot W) + 16 \cdot N \quad (13)$$

Embora o cobre e o níquel aumentem a resistência à corrosão generalizada e diminuam o crescimento dos pites, eles não contribuem na resistência a sua formação [14].

De forma geral, pode-se dizer que para aplicações que demandem resistência à corrosão por pites, deve-se utilizar um metal com $PREN \geq 35$, já naquelas que exigem resistência à corrosão por frestas, $PREN \geq 40$ [14]. Os AID que possuem $PREN \geq 40$ são classificados como superduplex [13, 14, 22], que costumam ter resistência mecânica e à corrosão superior as das ligas duplex padrão.

Os metais desta família têm sua solidificação primariamente ferrítica, sendo a austenita formada em transformações no estado sólido [13]. Além disso, o metal de solda depositado com arames duplex e superduplex podem ter número equivalente de resistência ao pite significativamente menor que o metal de base, se não tratado [14].

A liga duplex AISI 2209 tem composição nominal de 22,5 % de Cr, 8,5 % de Ni, 3 % de Mo e 0,15 % de N [22]. Ela é utilizada na soldagem de metais de base duplex que tenham aproximadamente 22 % de cromo ou 5 % de níquel [13, 22], como as AISI 2304, 2205 e 1803. Também é aplicável na soldagem de ligas austeníticas com duplex [13]. Ela possui alta resistência à tração, à trincamento por corrosão sob tensão e à corrosão por pites [22].

Já a liga 2594, considerada superduplex por ter $PREN$ maior que 40, tem composição nominal de cromo 25,5 %, níquel 9,2 %, molibdênio 3,5 % e nitrogênio 0,25 %. Ele é utilizado na soldagem de aços superduplex; de duplex, quando não há contato com ácido sulfúrico ou sulfuroso; e de aços carbono com aços duplex [22].

2.6. Modos de Solidificação

Dependendo da sua composição química os aços inoxidáveis podem ter uma solidificação primária austenítica ou ferrítica [13], como apresenta a figura 11. Ligas com altas concentrações de níquel irão solidificar como austenita e qualquer ferrita formada estará na região interdendrítica; já ligas com menor teor de níquel solidificam como ferrita, transformando-se posteriormente em austenítica através de reações peritéticas ou transformações no estado sólido [6], a figura 12 ilustra os modos de solidificação.

De acordo com *Lippold* [13], quando a solidificação acontece com austenita primária duas microestruturas são possíveis, ela pode ser totalmente austenítica, ou formar alguma ferrita- δ por reação eutética na região interdendrítica. Já quando a solidificação primária é ferrítica, a austenita é formada através de reação peritética ou pela transformação no estado sólido [6, 13].

De acordo com Lancaster [6], as equações de *Hammar* e *Svenson* para o cálculo do cromo e do níquel equivalentes, equações (14) e (15), tem um resultado melhor para prever o modo de solidificação que as de *Schaeffler*.

Nessas condições, quando o valor da razão Cr_{eq}/Ni_{eq} é menor que 1,5 o modo de solidificação primário é austenítico, que é susceptível a trinca de solidificação; quando o valor dessa razão está entre 1,5 e 1,95 o modo de solidificação é ferrítico-austenítico, no qual as primeiras dendritas são ferríticas e se transformam posteriormente em austenita por reação peritética durante a solidificação; já quando o valor da razão é maior que 1,95 a solidificação é ferrítica, havendo a nucleação de austenita somente após a solidificação [6].

$$Cr_{eq} = Cr + 1,37 \cdot Mo + 1,5 \cdot Si + 2 \cdot Nb + 3 \cdot Ti \quad (14)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0,81 \cdot Mn + 22 \cdot C + 14,2 \cdot N + Cu \quad (15)$$

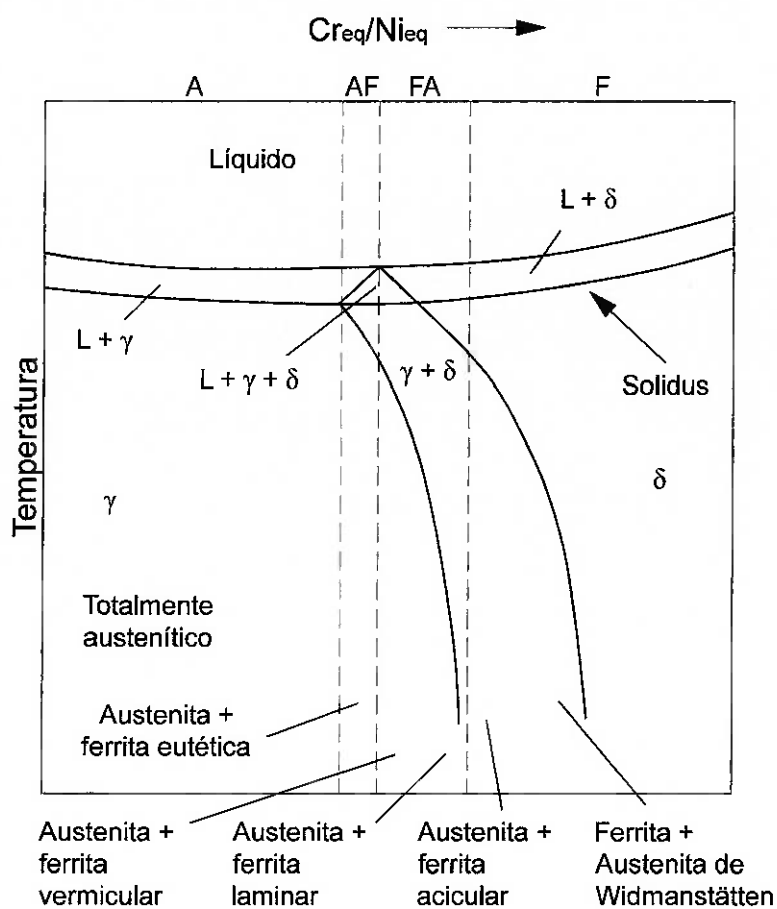


Figura 11: Relação dos modos de solidificação no diagrama de fases pseudobinário [13].

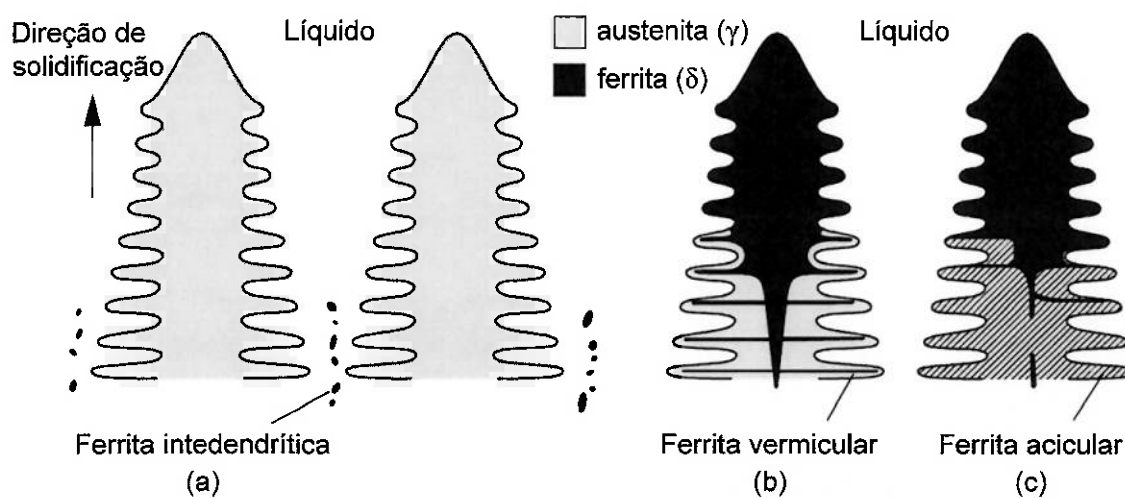


Figura 12: Modos de solidificação dos aços austeníticos: (a) austenítico com ferrita interdendrítica; (b) reação peritética; (c) ferrítica transformando ferrita em austenita no estado sólido [6].

Além disso, como é apresentado por *Lippold* [13], quando a solidificação é rápida há um aumento na estabilidade da austenita, em relação a ferrita, como fase primária devido ao sub-resfriamento da ponta da dendrita.

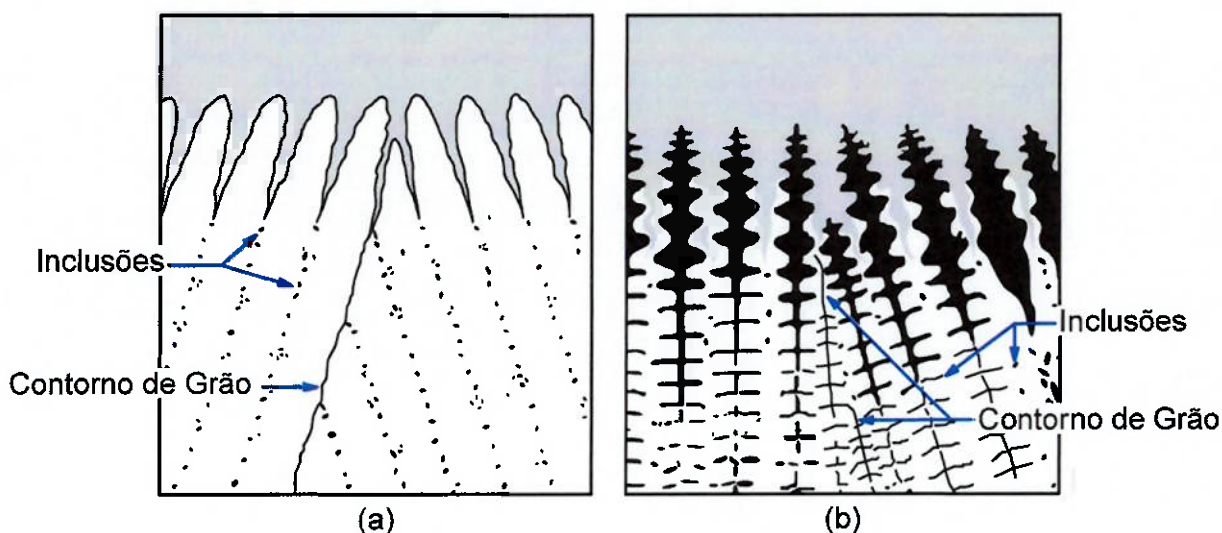


Figura 13: Efeito do modo de solidificação no formato do contorno de grão: (a) solidificação austenítica; (b) solidificação ferrítica-austenítica [13].

Devido à baixa solubilidade do enxofre e do fósforo na austenita, quando o modo de solidificação primário é austenítico esses elementos são levados para o contorno dos grãos, enfraquecendo-o [6, 13, 14], o que pode ocasionar trinca de solidificação. Dessa forma, quando o modo de solidificação primário é ferrítico-austenítico o S e P ficam aprisionados no interior da austenita, quando da transformação da ferrita em austenita [13, 14].

Como é apresentado por *Lippold* [13], outra vantagem do modo de solidificação primário austenítico é a existência de fronteiras ferrita-austenita não são planares, dificultando a propagação de trinca; o que não acontece com as fronteiras austenita-austenita e ferrita-ferrita, esse fenômeno é ilustrado pela figura 13.

3. Reações Químicas na Soldagem

Os metais fundidos são muito reativos, podendo reagir com praticamente qualquer gás, com exceção dos gases nobres, como o Ar e o He. Existem diversos métodos para proteger a poça de fusão dos gases atmosféricos, como o uso de gases inertes, escória ou vácuo [7].

A soldagem por AS é um processo protegido somente por escória, havendo uma baixa probabilidade de contato com o ar atmosférico. Pode-se assumir que a cavidade, apresentada nas figuras 2 e 7, é composta de vapores metálicos, compostos voláteis do fluxo e pequenas quantidades de monóxido de carbono e vapor d'água [23].

A presença de oxigênio e nitrogênio na poça de fusão é inevitável [7, 23], desta forma, é comum a adição de elementos desoxidantes e desnitrificantes como, por exemplo, Mn, Si, Al, Ti e Zr [2, 7], formando compostos que flutuam para a escória [7]. O oxigênio é o elemento mais importante na determinação da composição, microestrutura e propriedades do MS, pois reage com elementos de liga na poça [7, 23].

3.1. Reações Termoquímicas

A transferência de massa durante a soldagem pode ser estudada por um modelo geral de reação que considera dois estágios de reações: um estágio de alta temperatura, no qual as reações atingem um pseudoequilíbrio; e um estágio de resfriamento, no qual há rejeição de elementos dissolvidos [23], como ilustra a figura 14. No primeiro estágio acontecem as reações gás-metal e escória-metal, e no segundo a dessorção e precipitação de elementos supersaturados.

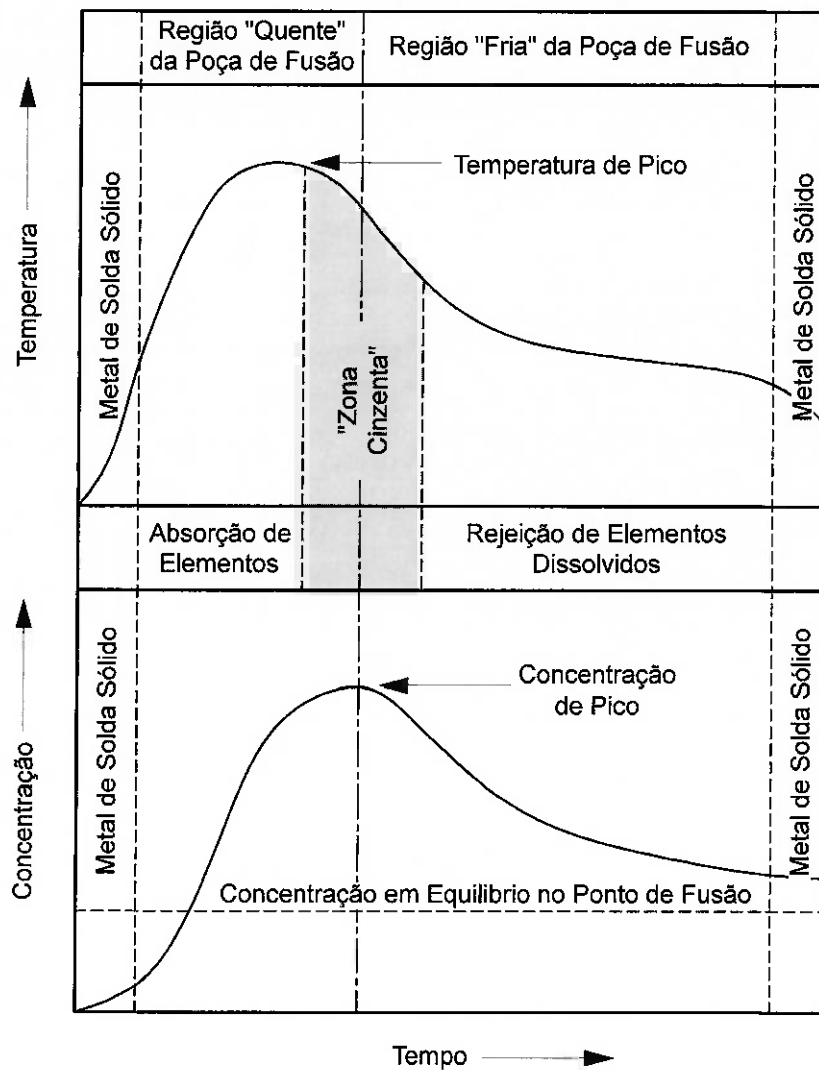


Figura 14: Modelo geral de dois estágios de reação para soldagem a arco [23].

A figura 15 ilustra as regiões da poça de fusão. Na região “quente” ocorrem oxidação e desoxidação simultaneamente e a separação da escória devido ao fluxo turbulento do metal fundido [23, 24], ilustrado na figura 7. Já na região “fria”, a separação da escória é incompleta, gerando precipitados, devido à pouca mistura do metal [23].

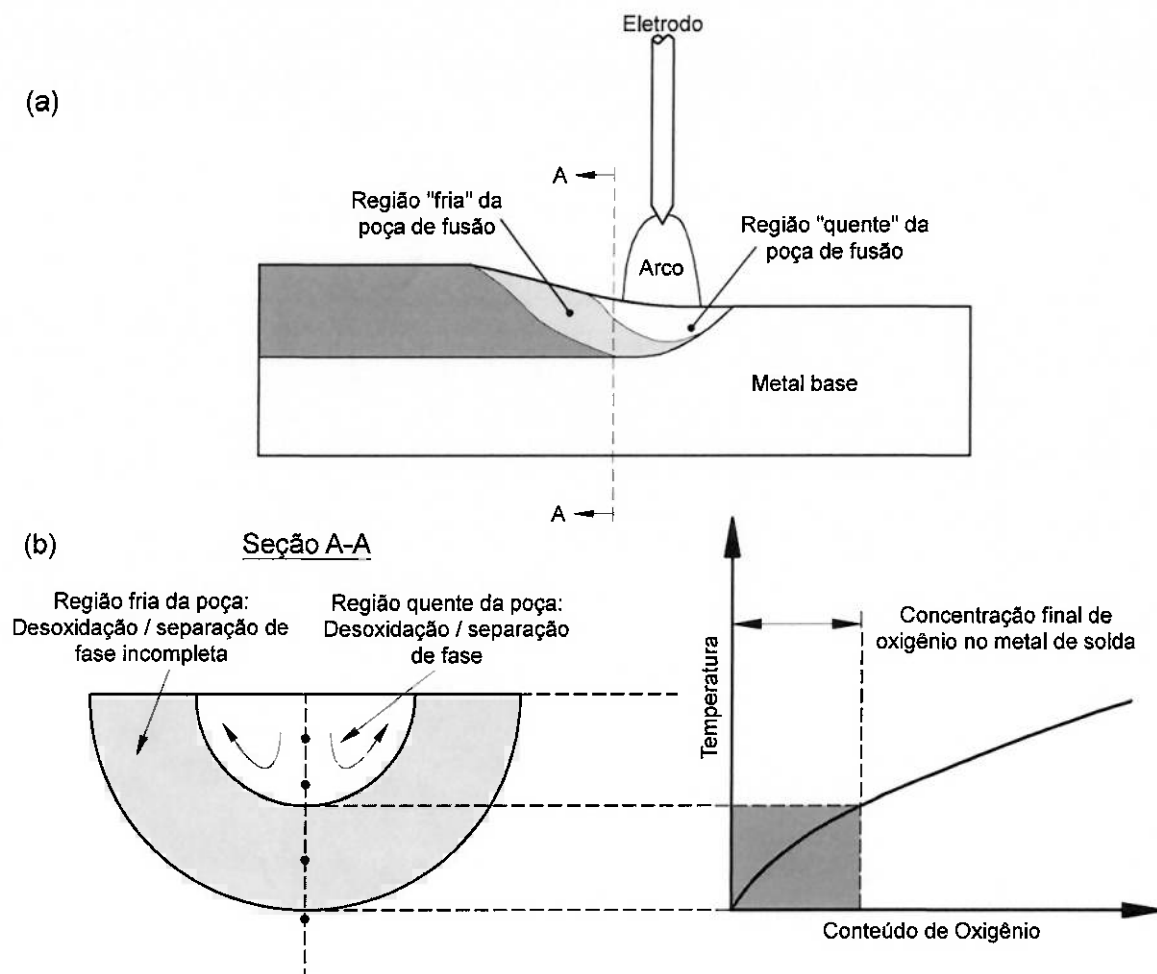


Figura 15: Diagrama esquemático apresentando as duas regiões da poça de fusão: (a) seção longitudinal da soldagem; (b) seção transversal A-A [23].

3.1.1. Reações Gás-Metal

Na soldagem por arco submerso o oxigênio vem principalmente do fluxo; o nitrogênio do metal de base e do metal de adição; e o hidrogênio da contaminação por umidade e hidrocarbonetos [2, 7, 23]. A quantidade de oxigênio gerada varia bastante com a composição do fluxo, quanto mais ácido o fluxo, maior a quantidade de oxigênio [2], como apresenta a figura 16. A basicidade do fluxo pode ser calculada pela equação (1), como apresentado anteriormente.

Os gases podem se dissolver no metal líquido até a saturação e permanecer dissolvido, dissolver além da saturação e gerar porosidade, e reagir quimicamente

precipitando compostos frágeis. Além disso, o gás dissolvido pode causar o endurecimento ou estabilizar determinadas fases metalúrgicas [7].

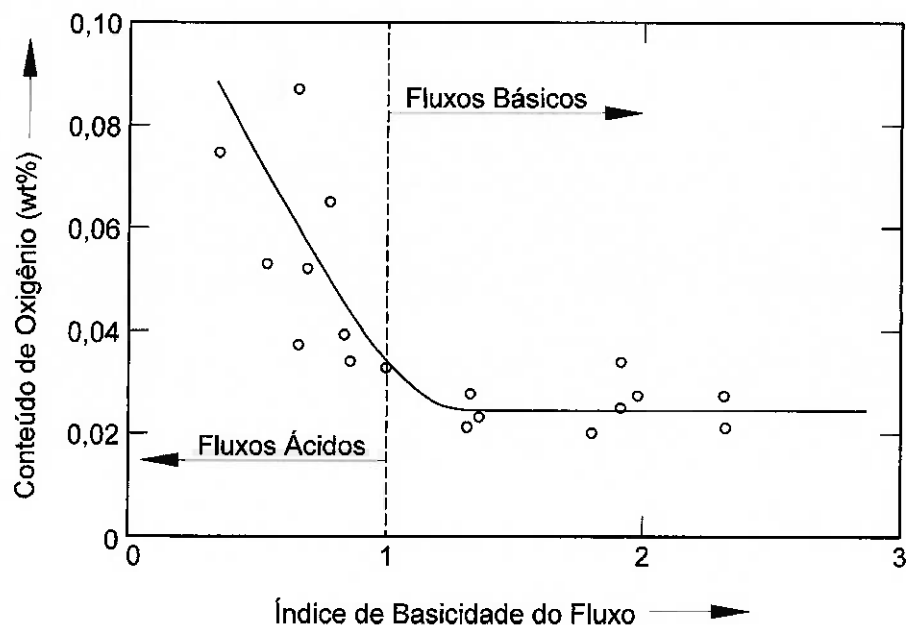


Figura 16: Concentração de oxigênio no metal de solda em função do índice de basicidade [23, 25].

A dissolução dos gases no metal líquido pode ser abordada como uma reação química gasosa [23], como é apresentado pela equação (16) [2]:

$$\frac{1}{2} N_{2(gás)} = \underline{N}_{(metal)} \quad (16)$$

O mesmo fenômeno pode ocorrer com outros gases, como o oxigênio e o hidrogênio [2]:

$$\frac{1}{2} O_{2(gás)} = \underline{O}_{(metal)} \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} H_{2(gás)} = \underline{H}_{(metal)} \quad (18)$$

As dissoluções dos gases diatômicos são governadas pela lei de Siewert [2, 23], apresentada na equação (19), que serve como base teórica para o cálculo da composição química do metal de solda [23].

$$[X] = k_X^d \cdot \sqrt{p_{X_2}} \quad (19)$$

Onde X pode ser oxigênio, hidrogênio ou nitrogênio, $[X]$ é a concentração do gás no metal líquido, k_X^d é a constante de equilíbrio e p_{X_2} é a pressão parcial do gás diatômico.

Devido à grande energia na coluna de plasma do arco elétrico, parte dos gases diatômicos é dissociado [23], como mostra a equação (20):

$$X_{2(gás)} = 2 X_{(gás)} \quad (20)$$

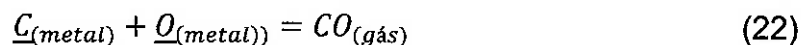
E, para os gases monoatômicos, a constante de equilíbrio é dado pela equação (21):

$$[X] = k_X^m \cdot p_x \quad (21)$$

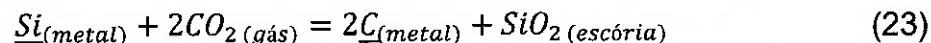
Onde X pode ser o oxigênio, hidrogênio ou nitrogênio, $[X]$ é a concentração do gás no metal líquido, k_X^d é a constante de equilíbrio e p_{X_2} é a pressão parcial do gás monoatômico.

De acordo com *Palmer e DebRoy* [26], a pressão parcial de nitrogênio monoatômico no plasma do arco elétrico aumenta a sua concentração no metal de solda; além disso, eles mostram que a adição de oxigênio no plasma aumenta a densidade de N monoatômico, resultando num maior teor de nitrogênio no MS.

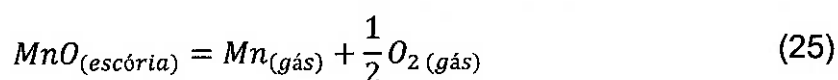
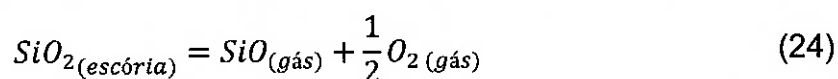
O oxigênio é responsável pela oxidação do carbono [2, 7, 23], como mostra a equação (22), além de outros elementos de liga através de reações escória metal, explicados mais a frente.



Entretanto, de acordo com Grong [23], o aumento no teor de silício bloqueia a oxidação do carbono, como apresenta a equação (23).



Como mencionado anteriormente, o fluxo é a principal fonte de oxigênio na soldagem por AS, através da decomposição de óxidos reduzidos facilmente [2, 7, 23]. Nos fluxos com menos de 10 % de FeO , o MnO e o SiO_2 são as principais fontes de oxigênio [2], como mostram as equações (24) e (25).



O nitrogênio pode reduzir a ductilidade do metal de solda [2, 23], ele é responsável pela inclusão de nitretos frágeis que podem iniciar a nucleação de trincas no metal [2]. A solubilidade do N em aços com quantidades significantes de elementos nitrificantes, como os AIA, é cerca de quatro vezes maior.

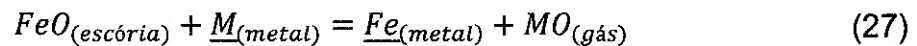
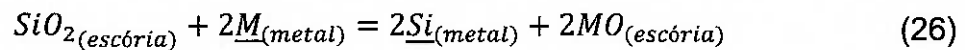
O hidrogênio é responsável por vários defeitos relacionados com a soldagem, como a trinca induzida por hidrogênio e porosidade, por exemplo. As principais fontes de H no MS são a umidade no fluxo e a contaminação por óleos e graxas do metal de base e do metal de adição [2, 23]. Há indícios que o aumento na concentração de CaF_2 reduz a quantidade de hidrogênio no MS [2].

3.1.2. Reações Escória-Metal

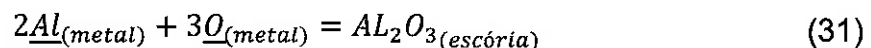
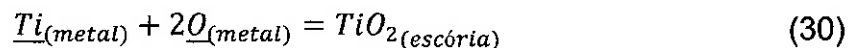
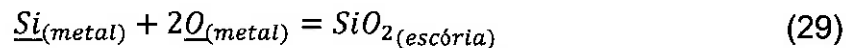
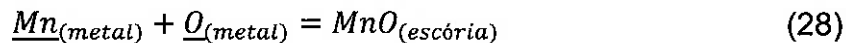
A escória é formada por uma mistura de vidro e cerâmicas de estrutura cristalina, seus principais constituintes são os silicatos, aluminatos e titanatos. As reações químicas escória-metal ocorrem numa temperatura aproximada de 1900 °C, próximo

à região quente da poça, resultando na formação de óxidos que irão para a escória [7].

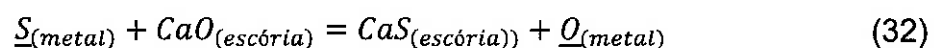
As reações escória metal podem ser de decomposição de óxidos, oxidação de elementos de liga e de dessulfurização. A equação (26) apresenta a absorção de silício da escória, onde M pode ser Al ou Ca ; e a equação (27), a perda de elementos de transição, onde M pode ser Al , Ca ou Mn [24].



As equações (28) a (31) apresentam a oxidação de alguns elementos de liga e a equação (32) mostra a dessulfurização do metal de solda [2]:



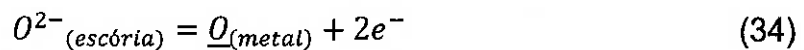
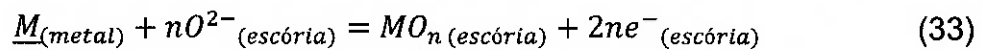
De acordo com Kou [2], o CaF_2 reduz a oxidação pela dissolução de óxidos reativos. Além disso, pode haver a perda de manganês por evaporação.



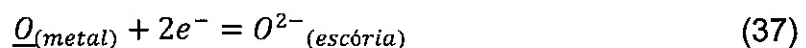
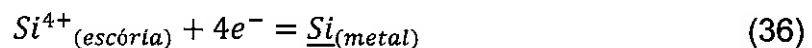
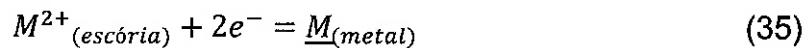
3.2. Reações Eletroquímicas

As reações eletroquímicas ocorrem na interface entre o metal fundido e a escória líquida. Elas se dividem em *reações de oxidação anódica*, que ocorrem no catodo; e *reações de redução catódica*, que acontecem no anodo [2, 24].

As equações (33) e (34) apresentam as *reações de oxidação anódica*, nas quais o metal perde elementos de liga para a escória e absorve oxigênio [24], onde M representa metais de liga dissolvidos na poça de fusão.



As equações (35) a (37) mostram as *reações de redução catódica*, em que a poça de fusão absorve metais da escória e perde oxigênio [2, 24], nestas equações M representa metais existentes na escória fundida.



Como ilustrado pela figura 17, quando a soldagem é realizada com CCPR(-) na interface entre o metal fundido na ponta do eletrodo e a escória ocorrem as *reações de oxidação anódica*, e na interface da poça de fusão com a escória acontecem as *reações de redução catódica*; na soldagem com CCPD(+) as reações ocorrem de forma inversa [2].

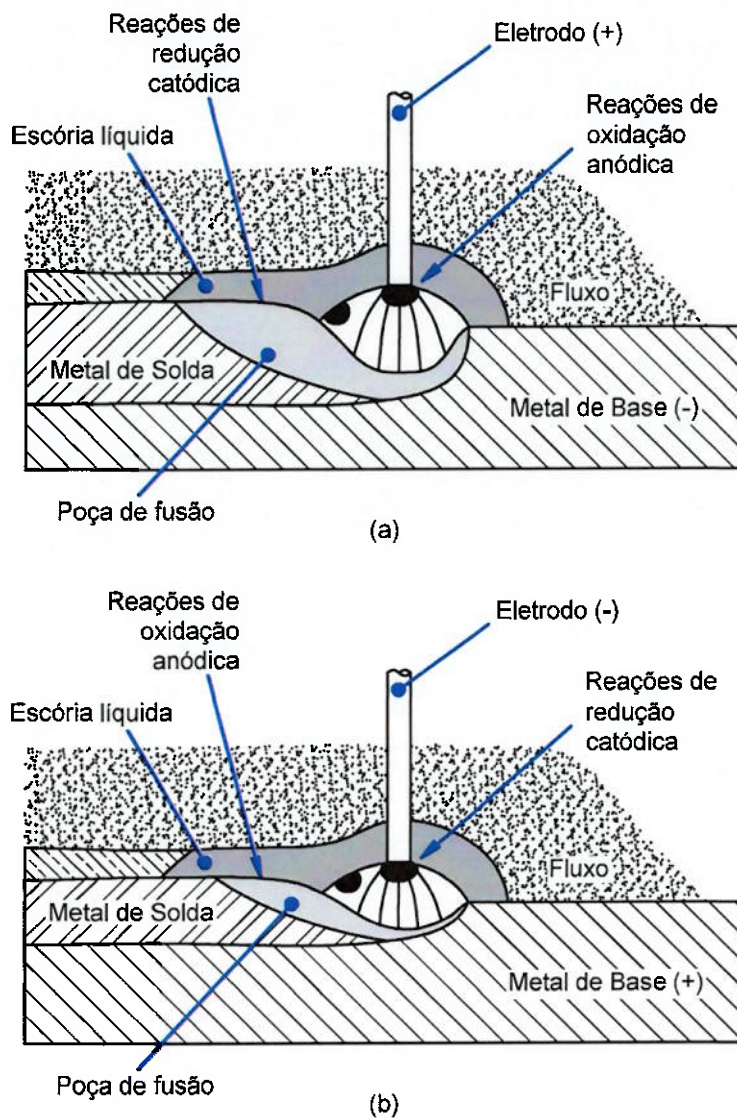


Figura 17: Reações eletroquímicas na soldagem: (a) polaridade CCPD(+); (b) CCPR(-).

Quando a gota de metal fundida se desprende da ponta do eletrodo, não ocorrem nela mais reações eletroquímicas [2]; mas, devido à maior densidade de corrente na ponta do eletrodo, as reações eletroquímicas no metal de adição têm uma maior influência na composição do metal de solda [2, 24].

MATERIAIS E MÉTODOS

1. Introdução

Para realizar a avaliação dos efeitos do balanço da onda quadrada da soldagem por AS na composição química do metal de solda depositado com eletrodos austeníticos (ER308L e ER309L), duplex (ER2209) e superduplex (ER2594), foram realizadas soldagens de corpos de prova (*weld pads*) com cada um dos metais de adição, conforme norma AWS A5.23/A5.23M. Os arames ER308L e ER2209 tinham diâmetro nominal Ø 3,2 mm; já os ER309L e ER2594, Ø 2,4 mm.

A composição química foi levantada por meio de espectrômetro por emissão óptica e cromatografia gasosa; com os resultados foram avaliados os aumentos e reduções do teor de determinados elementos no metal de solda em relação à composição original do metal de adição.

Para, por fim, poder analisar o efeito do balanço, e de cada um dos ciclos positivo e negativo, na composição do MS com base nas reações termoquímicas e eletroquímicas que ocorrem durante a soldagem.

Uma vez que a energia de soldagem foi mantido constante para todas as condições de soldagem, supôs-se que a perda de elementos por vaporização foi constante, sendo assim desconsideradas nas análises.

2. Materiais

2.1. Corpos de Prova (*Weld Pads*)

Os corpos de prova (*weld pads*) foram confeccionados através da soldagem de quatro camadas, cada uma com três passes, como ilustra a figura 18, utilizando a mesma combinação eletrodo/fluxo, com temperatura de interpasse inferior a 150 °C, como determina a norma AWS A5.23/A5.23M [27]. Essa configuração minimiza a interferência do MB na composição química do MS.

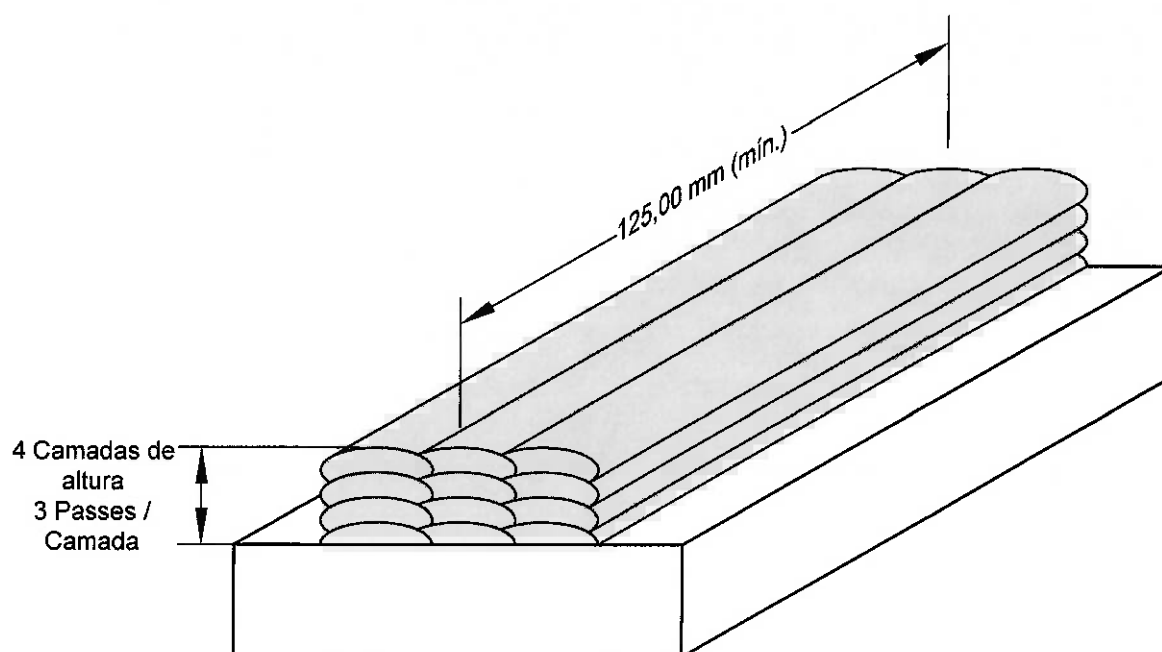


Figura 18: Corpo de prova (*weld pad*) para análise química do metal de solda [27].

2.2. Metal de Base

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizados pedaços de chapas em aço inoxidável AISI 304L, de espessura 25,4 mm. A tabela 1 apresenta a composição química do metal de base (MB).

Tabela 1: Composição química da chapa (%).

C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V
0,018	0,480	0,002	0,029	1,330	8,380	18,160	0,074	0,039
Cu	Co	Ti	B	Al	Nb	N	O	
0,096	0,063	0,006	0,000	0,003	0,031	0,053	0,004	

2.3. Consumíveis

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados os eletrodos austeníticos ER308L e ER309L, combinados com fluxo Carbox ME, da Lincoln Electric; e os arames ER2209 e ER2594, duplex e superduplex respectivamente, combinados com fluxo SBB da Metrode. A tabela 2 apresenta a composição química dos eletrodos.

O fluxo Carbox ME é básico, neutro e recomendado para a soldagem de aços baixa liga e de aços inoxidáveis das famílias 300 e 400. Já o SBB é um fluxo aglomerado, básico e neutro, recomendado para a soldagem de diversos tipos de aços inoxidáveis.

Tabela 2: Composição química dos eletrodos.

ER308L								
C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V*
0,012	0,410	0,013	0,022	1,880	9,140	19,680	0,290	-
Cu	W*	Ti*	Sn*	Al	Nb*	N	O*	
0,160	-	-	-	0,004	-	0,072	-	
ER309L								
C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V
0,020	0,480	<0,010	0,020	2,020	13,960	23,030	0,130	0,060
Cu	W*	Ti*	Sn*	Al	Nb	N*	O*	
0,060	-	-	-	0,010	0,020	-	-	
ER2209								
C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V*
0,010	0,430	0,001	0,017	1,630	8,610	22,890	3,120	-
Cu	W*	Ti*	Sn*	Al	Nb	N	O*	
0,130	-	-	-	0,007	0,010	0,160	-	
ER2594								
C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V
0,012	0,400	0,001	0,017	0,360	9,490	25,170	3,900	0,053
Cu	W	Ti	Sn*	Al*	Nb	N	O*	
0,099	0,010	0,005	-	-	0,010	0,240	-	

* Elemento não consta no certificado do fabricante.

3. Soldagem

3.1. Equipamentos

Para a execução da soldagem foi utilizado uma fonte de solda modelo *Power Wave® AC/DC 1000 SD Subarc Welder* acoplado a um controlador de soldagem modelo *MAXsa 10 Controller – K2814-1*, ambos da *Lincoln Electric*. A figura 19 mostra o equipamento utilizado.

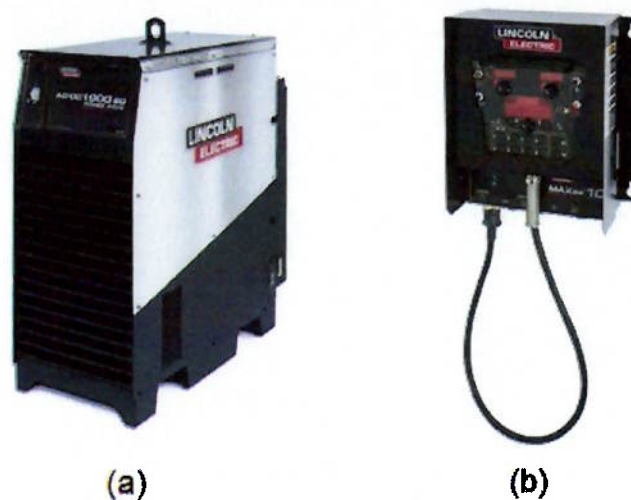


Figura 19: Equipamentos utilizados para a soldagem: (a) fonte de alimentação; (b) controlador.

3.2. Procedimento

A soldagem foi executada sem pré-aquecimento, na posição plana, pelo processo de soldagem por arco submerso com onda quadrada em corrente alternada. Foram utilizados arames de diâmetro nominal $\varnothing 3,2$ mm e $\varnothing 2,4$ mm, mantendo-se constante o aporte térmico e a densidade de corrente na ponta do eletrodo, apresentados nas equações (38) e (39) respectivamente. Adotando-se para o arame de $\varnothing 3,2$ mm uma corrente de 450 A e velocidade de soldagem de 7,62 mm/s (18 in/min):

$$J = \frac{I_{\phi 3,2}}{A_{\phi 3,2}} = \frac{450}{\pi \cdot \left(\frac{3,2}{2}\right)^2} = 55,95 \text{ A/mm}^2 \quad (38)$$

$$HI = \frac{V \cdot I_{\phi 3,2}}{vel_{\phi 3,2}} = \frac{30 \cdot 450}{7,62} = 1,77 \text{ kJ/mm} \quad (39)$$

Desta forma, temos que para o eletrodo de Ø 2,4 mm, a corrente e a velocidade de soldagem serão:

$$I_{\phi 2,4} = J \cdot A_{\phi 2,4} = 55,95 \cdot \pi \cdot \left(\frac{2,4}{2}\right)^2 \Rightarrow I_{\phi 2,4} = 253,13 \text{ A}$$

$$vel_{\phi 2,4} = \frac{V \cdot I_{\phi 2,4}}{HI} = \frac{30 \cdot 253,13}{1,77 \cdot 10^3} \Rightarrow vel_{\phi 2,4} = 4,29 \text{ mm/s}$$

Todos os parâmetros foram mantidos constantes, como mostra a tabela 3, com exceção do balanço, que foi variado em 25%, 50% e 75% para cada um dos eletrodos.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem.

Ø do Arame	Balanço	Frequência	Tensão	Corrente	Velocidade de Soldagem
3,2 mm	25%	70 Hz	30 V	450 A	7,62 mm/s
	50%				
	75%				
2,4 mm	25%	70 Hz	30 V	253 A	4,29 mm/s
	50%				
	75%				

4. Ensaaios

4.1. Análises Químicas

A composição química dos metais de solda foi levantada através de espectrômetro por emissão óptica, realizada na face da última camada do corpo de prova. Com os dados obtidos foi calculada a média e o desvio padrão de cada conjunto de amostras de cada elemento. Essas foram comparadas entre si através do p-valor calculado pelo *teste t* de *Student*, um p-valor menor ou igual a 0,05 indica que há diferença significativa entre as amostras.

A partir das amostras que apresentaram diferença significativa, foram avaliados os efeitos do balanço da onda quadrada, para cada um dos metais de adição, nas composições químicas; na proporção de ferrita e nos modos primários de solidificação.

Também foram elaborados gráficos apresentando a concentração dos elementos nos metais de solda, em absoluto e normalizados em relação ao Fe, para análise dos efeitos do balanço na composição química para cada um dos metais de adição.

4.2. Medição de Ferrita- δ com Ferritoscópio

Foi medida a quantidade de ferrita- δ em cada um dos cordões de solda utilizando um ferritoscópio, que mede a quantidade de ferrita a partir do princípio da indução magnética. Esses valores foram comparados com o esperado pelos diagramas de predição, Schaeffler e WRC-1992.

RESULTADOS E ANÁLISES

1. Resultado das Análises Químicas

As tabelas 4 a 6 apresentam os resultados da composição química dos metais de solda analisados por espectrômetro por emissão óptica, com esses dados foi possível representar no diagrama de *Schaeffler* e no WRC-1992 os resultados obtidos exibidos na tabela 8, a figura 24 contém a representação desses resultados nos diagramas. O apêndice A apresenta o valor de todas as amostras tratadas, bem como o p-valor obtido através do teste t de *Student*, aquelas amostras que apresentam diferença significativa entre si a célula do p-valor encontra-se em vermelho, o laboratório que realizou a medição de N e O por cromatografia gasosa somente apresentou os valores médios, impossibilitando assim a comparação das amostras pelo teste t de *Student*.

Tabela 4: Composição química dos metais de solda obtidos a partir da soldagem com eletrodo ER308L.

Balanco	Teor (%)					
25%	C	Si	S	P	Mn	Ni
	0,0254	0,7452	0,0074	0,0251	1,9478	8,9569
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	19,6601	0,2795	0,0353	0,1584	0,0210	0,0035
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0047	0,0092	0,0035	0,0750	0,0234	
50%	C	Si	S	P	Mn	Ni
	0,0257	0,8905	0,0041	0,0190	2,0534	8,5840
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	19,3364	0,2885	0,0388	0,1509	0,0210	0,0040
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0046	0,0123	0,0053	0,0690	0,0232	
75%	C	Si	S	P	Mn	Ni
	0,0271	0,8445	0,0036	0,0174	2,0340	8,7635
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	19,5352	0,2804	0,0363	0,1530	0,0206	0,0038
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0047	0,0134	0,0045	0,0650	0,0260	

Tabela 5: Composição química dos metais de solda obtidos a partir da soldagem com eletrodo ER309L.

Balanço	Teor (%)					
	C	Si	S	P	Mn	Ni
25%	0,0223	0,6968	0,0047	0,0147	1,8545	12,7469
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	23,0968	0,1071	0,0385	0,0349	0,0153	0,0041
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0029	0,0132	0,0060	0,0680	0,0290	
50%	C	Si	S	P	Mn	Ni
	0,0230	0,7422	0,0045	0,0158	1,8725	12,5605
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	22,8756	0,1053	0,0377	0,0382	0,0152	0,0041
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0030	0,0140	0,0058	0,0670	0,0310	
75%	C	Si	S	P	Mn	Ni
	0,0247	0,8106	0,0024	0,0130	1,9039	12,0666
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	22,3091	0,1066	0,0402	0,0419	0,0174	0,0047
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0031	0,0242	0,0075	0,0650	0,0380	

Tabela 6: Composição química dos metais de solda obtidos a partir da soldagem com eletrodo ER2209.

Balanço	Teor (%)					
	C	Si	S	P	Mn	Ni
25%	0,0156	0,5609	0,0014	0,0161	1,2991	8,2290
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	22,8667	3,0385	0,0639	0,1430	0,0278	0,0020
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0050	0,0272	0,0075	0,1060	0,0380	
50%	C	Si	S	P	Mn	Ni
	0,0138	0,5453	0,0012	0,0167	1,2445	8,3010
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	22,5931	2,9063	0,0613	0,1424	0,0273	0,0021
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0049	0,0270	0,0068	0,1020	0,0362	
75%	C	Si	S	P	Mn	Ni
	0,0193	0,6070	0,0016	0,0158	1,1953	8,2850
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	22,3458	2,8204	0,0606	0,1418	0,0287	0,0035
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0050	0,0323	0,0076	0,1030	0,0378	

Tabela 7: Composição química dos metais de solda obtidos a partir da soldagem com eletrodo ER2594.

Balanço	Teor (%)					
	C	Si	S	P	Mn	Ni
25%	0,0196	0,4775	0,0012	0,0195	0,2692	9,1820
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	25,0836	3,7911	0,0445	0,1089	0,0303	0,0019
50%	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0039	0,0252	0,0077	0,1560	0,0310	
	C	Si	S	P	Mn	Ni
75%	0,0165	0,5072	0,0014	0,0202	0,2575	9,2138
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	24,7559	3,7523	0,0451	0,1089	0,0301	0,0018
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0035	0,0242	0,0075	0,1460	0,037	
	C	Si	S	P	Mn	Ni
	0,0194	0,5867	0,0013	0,0113	0,2627	8,7966
	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti
	24,2450	3,9726	0,0483	0,1012	0,0296	0,0022
	Sn	Al	Nb	N	O	
	0,0038	0,0328	0,0095	0,1350	0,0350	

Tabela 8: Cálculo do cromo equivalente e do níquel equivalente conforme diagrama Schaeffler e WRC-1992.

Eletrodo	Balanço	Schaeffler		WRC-1992	
		Cr _{eq} eq. (9)	Ni _{eq} eq. (10)	Cr _{eq} eq. (11)	Ni _{eq} eq. (12)
ER308L	25%	21,059	10,692	19,942	11,384
	50%	20,963	10,383	19,629	10,902
	75%	21,085	10,593	19,819	11,049
ER309L	25%	24,252	14,343	23,208	14,896
	50%	24,097	14,186	22,985	14,714
	75%	23,635	13,761	22,421	14,243
ER2209	25%	26,750	9,348	25,910	10,932
	50%	26,321	9,338	25,504	10,860
	75%	26,081	9,461	25,172	11,055
ER2594	25%	29,595	9,905	28,880	13,016
	50%	29,273	9,839	28,513	12,760
	75%	29,102	9,511	28,224	12,202

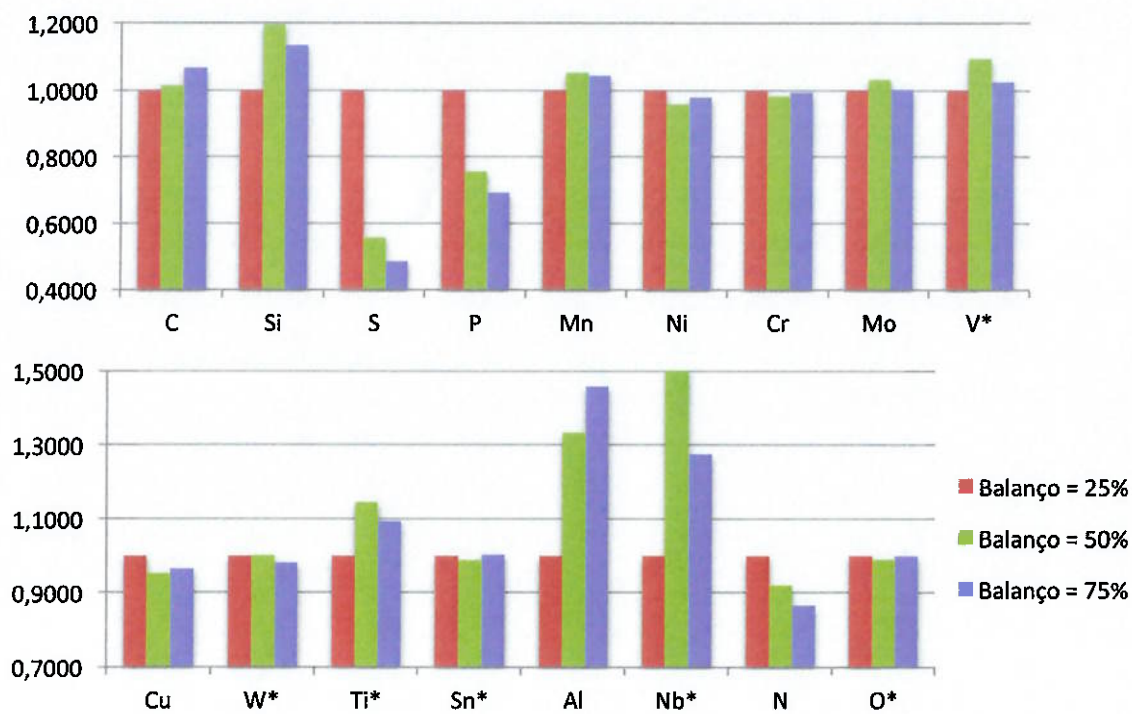


Figura 20: Quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda obtido na soldagem com o eletrodo ER308L.

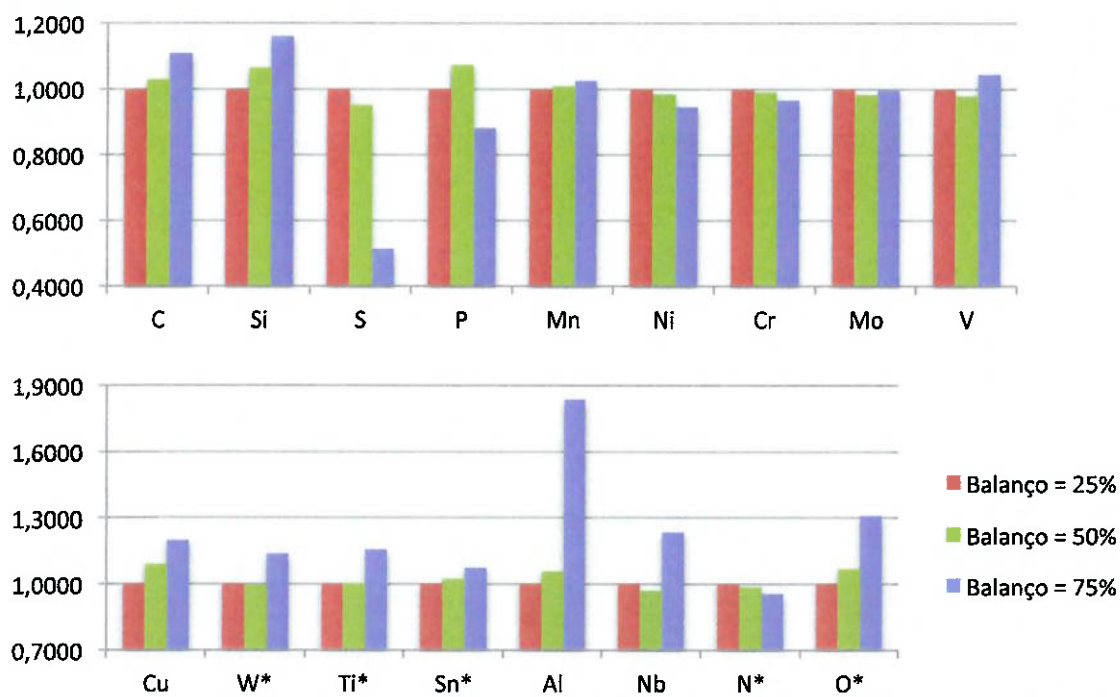


Figura 21: Quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda obtido na soldagem com o eletrodo ER309L.

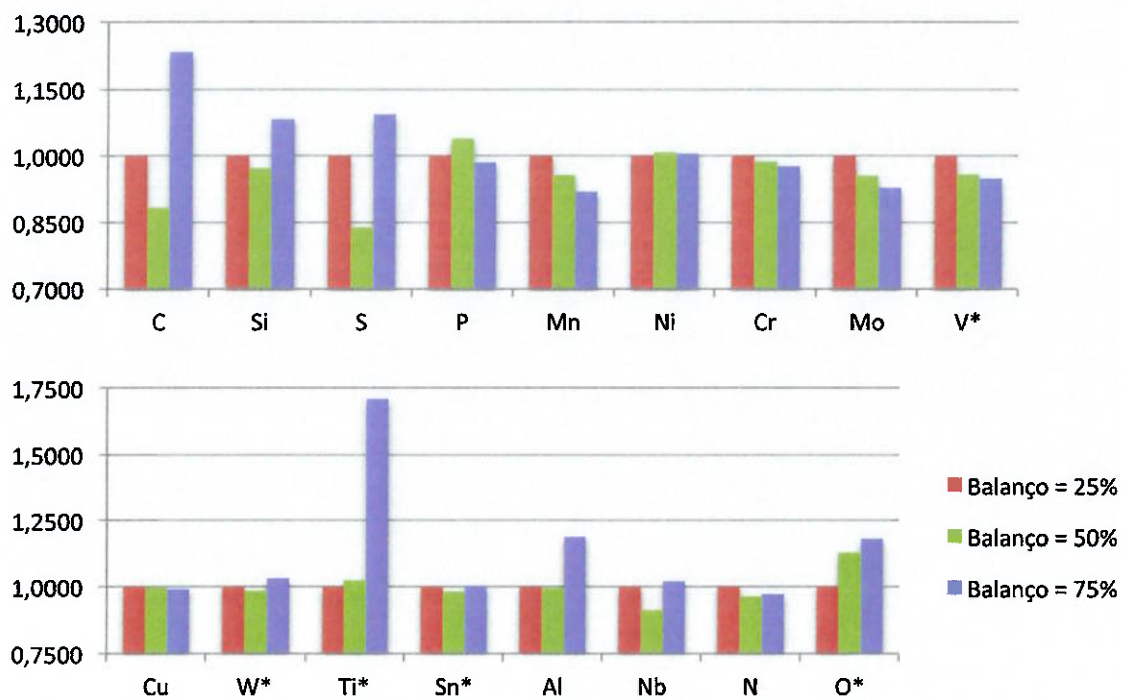


Figura 22: Quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda obtido na soldagem com o eletrodo ER2209.

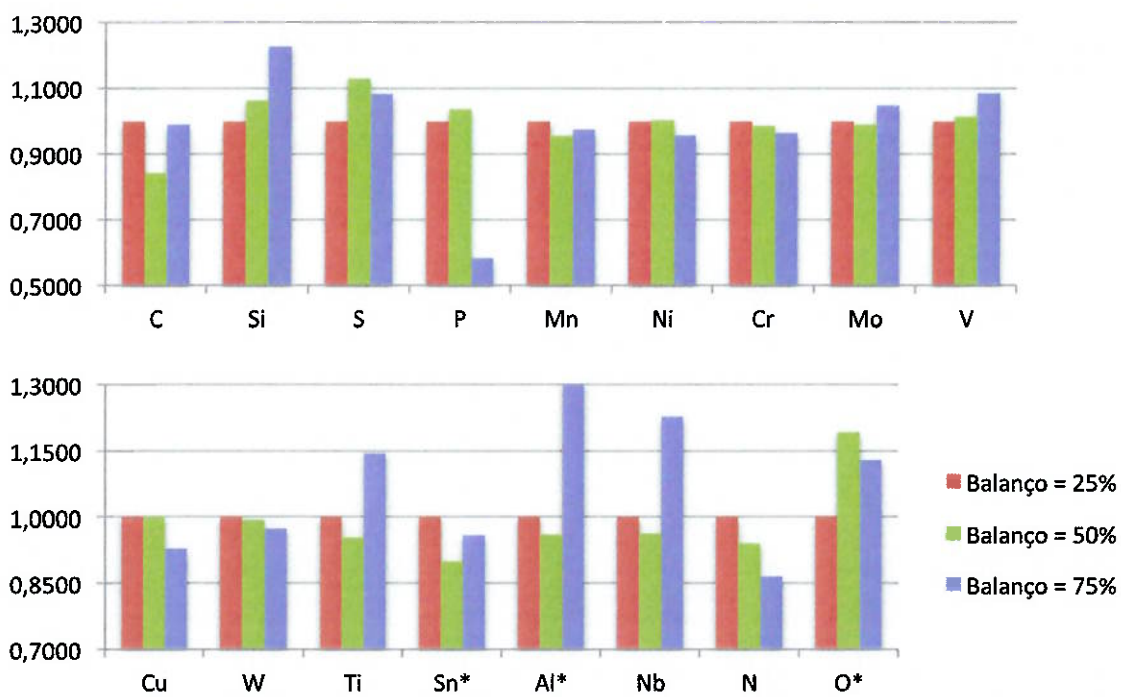
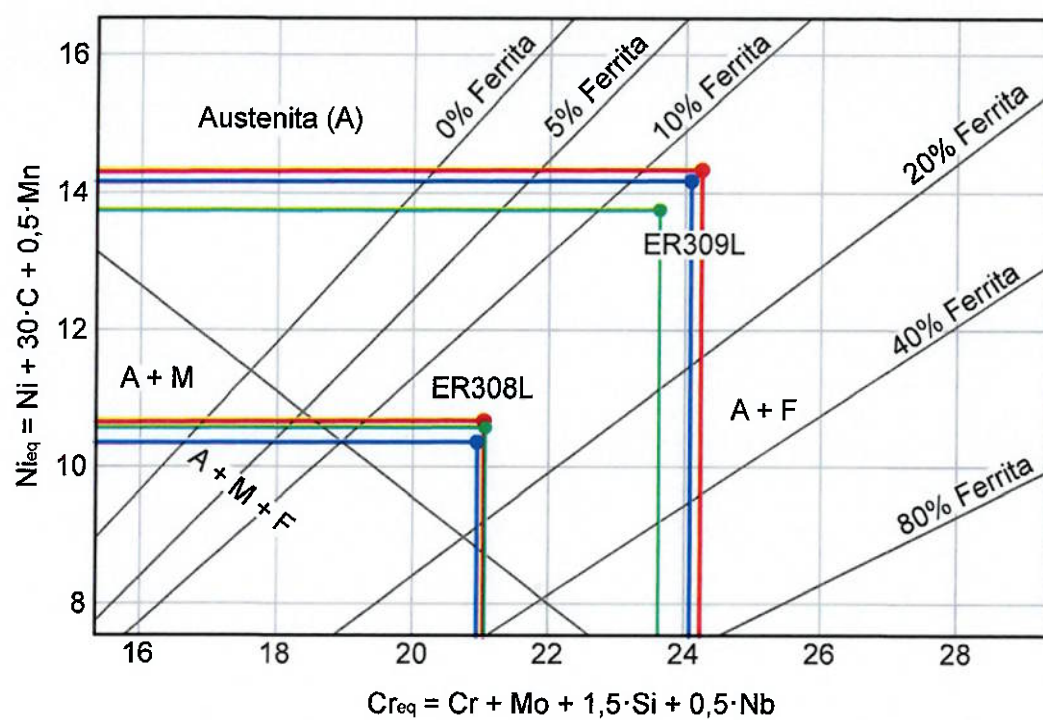
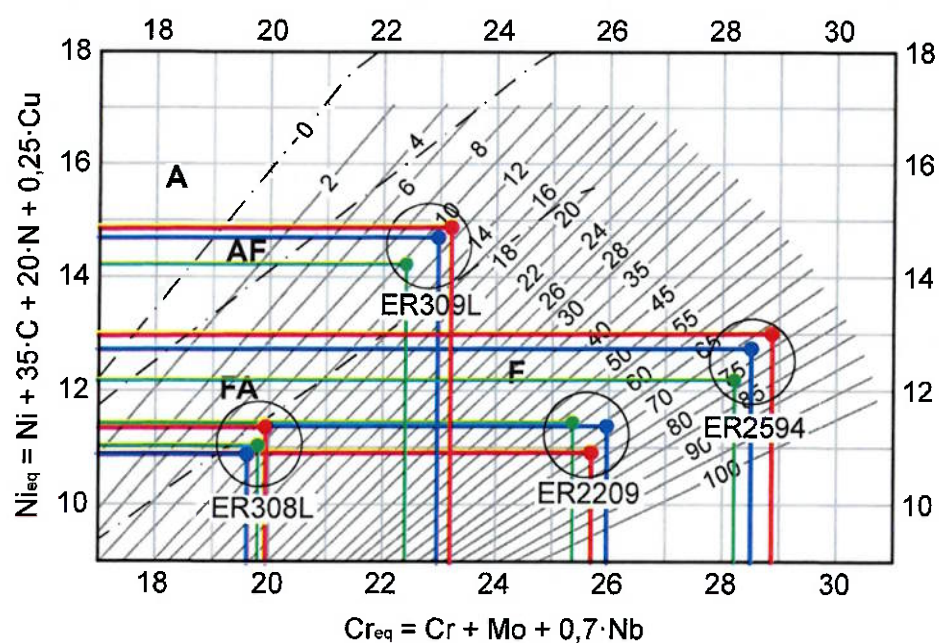


Figura 23: Quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda obtido na soldagem com o eletrodo ER2594.



(a)



(b)

—●— Balanço = 25%; —●— Balanço = 50%; —●— Balanço = 75%.

Figura 24: Representação gráfica dos resultados: (a) diagrama de Schaeffler; (b) diagrama WRC-1992.

As figuras 20 a 23 apresentam o quantitativo normalizado dos elementos no metal de solda. Essa normalização foi obtida dividindo o teor do elemento no MS em cada um dos corpos de prova, pelo valor encontrado para o de balanço 25% para, dessa forma, avaliar aumento ou redução das concentrações. No apêndice B estão os gráficos com os quantitativos medidos em percentagem.

Tabela 9: Avaliação qualitativa da variação do teor de cada elemento com o aumento do balanço.

	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
ER308L	A	A@50%	D	D	A	D	D
ER309L	A	A	-	-	-	D	D
ER2209	A	A	-	-	D	-	D
ER2594	D@50%	A	-	D	D	D	D
	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al
ER308L	-	A@50%	D	D	A	-	A
ER309L	D	-	A	-	-	-	A
ER2209	D	D	-	-	-	D	A
ER2594	A	A	D	-	D@50%	D	A
	Nb	N	O				
ER308L	A	D	-				
ER309L	-	D	A				
ER2209	-	D	A				
ER2594	A	D	A				

A: Teor do elemento aumenta com o aumento do balanço.

D: Teor do elemento diminui com o aumento do balanço.

@ 50%: Teor do elemento se altera com balanço de 50%.

A tabela 9 mostra qualitativamente a alteração no teor de cada um dos elementos nos corpos de prova, que apresentaram diferença significativa entre suas amostras, em função do aumento do balanço. A partir dessa tabela pode-se observar que o teor de carbono, o silício, o alumínio e o oxigênio no MS aumentam com o aumento do balanço, enquanto que o níquel, o cromo e o nitrogênio diminuem.

O aumento do teor de silício e alumínio indica que eles sofrem mais intensamente reações de redução catódica. Já a diminuição do teor de níquel, cromo e o aumento

do oxigênio indicam que esses elementos sofrem reações de oxidação anódica mais pronunciadamente.

Dado que quanto maior o balanço, maior é a fração de tempo que o eletrodo fica na polaridade positiva, tem-se que o Si e o Al sofrem mais intensamente reações de redução catódica na interface entre a poça de fusão e a escória líquida do que reações de oxidação anódica na interface entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão; enquanto que ocorre o inverso para o níquel, o cromo e o oxigênio.

O aumento da concentração de oxigênio também pode ser em parte devido ao aumento da região quente da poça de fusão, que está ligado à maior diluição causada pela polaridade reversa.

Constatou-se que o teor de carbono também aumenta com o balanço, entretanto ele não está sujeito a reações eletroquímicas, sendo, desta forma, sua concentração ligada à oxidação ou ao aumento do silício, que reage parcialmente com gases existentes na cavidade do arco, como mostrado pelas equações (22) e (23).

Como discutido anteriormente, o conteúdo de oxigênio no plasma da coluna do arco elétrico aumenta a densidade de nitrogênio monoatômico e, conseqüentemente, o seu teor no MS. Uma vez que foi observado que o teor de oxigênio aumenta no MS e o de nitrogênio diminui, é possível que a absorção de O pela poça de fusão através de reações de oxidação anódica cause a redução de sua pressão parcial na cavidade do arco, acarretando uma redução na quantidade de nitrogênio dissolvido no metal de solda.

Não foi possível avaliar o comportamento dos demais elementos no metal de solda, devido a falta de repetibilidade nos resultados ou a inexistência de amostras com

diferenças significantes, sendo necessário aprofundar a investigação para aumentar o espaço amostral e, assim, diminuir as incertezas.

2. Modo de Solidificação e Número Equivalente de Resistência a Pite

Na tabela 10 são apresentados os resultados dos cálculos da razão Cr_{eq}/Ni_{eq} , pelas equações de *Hammar* e *Svenson*, e do número equivalente de resistência a pite. A partir dos valores obtidos, espera-se que todos os MS dos eletrodos austeníticos (ER308L e ER309L) tenham modo de solidificação primário ferrítico-austenítico, pois $1,5 < Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1,95$, enquanto que os ER2209 e ER2594 deve solidificar no modo ferrítico, sendo a austenita formada no estado sólido.

Observando o diagrama WRC-1992, na figura 24 (b), nota-se que o modo de solidificação previsto para o ER308L é ferrítico, que difere do previsto pelas equações (14) e (15), de *Hammar* e *Svenson*. Essa diferença ocorre, principalmente, porque o cálculo do Ni_{eq} , pela equação (15), leva em consideração o manganês como elemento austenizante. Para conferir qual dos métodos apresenta um resultado mais preciso seria necessário realizar a metalografia do corpo de prova, que não faz parte do escopo deste estudo.

É possível observar pela tabela 10 que o valor do número equivalente de resistência ao pite para o eletrodo ER2209 apresenta valores acima de 30, que é aceitável para ligas de aço inoxidável duplex; enquanto que para o ER2594 o valor de PREN fica ligeiramente abaixo do mínimo especificado para aços inoxidáveis superduplex.

Como apresentado na figura 25, PREN tem uma tendência de queda, com o aumento do balanço devido à diminuição no teor de cromo e de nitrogênio; somente para o eletrodo ER309L soldado com balanço de 75% não foi observada essa tendência, devido a um aumento significativo no teor de tungstênio.

Tabela 10: Resultado do cálculo da razão Cr_{eq}/Ni_{eq} e do número equivalente de resistência à pites.

Eletrodo	Balanço	Solidificação			PREN eq. (13)
		Cr_{eq} eq. (14)	Ni_{eq} eq. (15)	Cr_{eq} / Ni_{eq}	
ER308L	25%	21,178	12,316	1,720	21,817
	50%	21,090	11,944	1,766	21,427
	75%	21,207	12,083	1,755	21,534
ER309L	25%	24,313	15,740	1,545	24,563
	50%	24,157	15,572	1,551	24,320
	75%	23,700	15,118	1,568	23,730
ER2209	25%	27,892	11,273	2,474	34,636
	50%	27,412	11,204	2,447	33,861
	75%	27,146	11,282	2,406	33,348
ER2594	25%	31,015	12,156	2,551	40,140
	50%	30,678	11,983	2,560	39,540
	75%	30,593	11,455	2,671	39,564

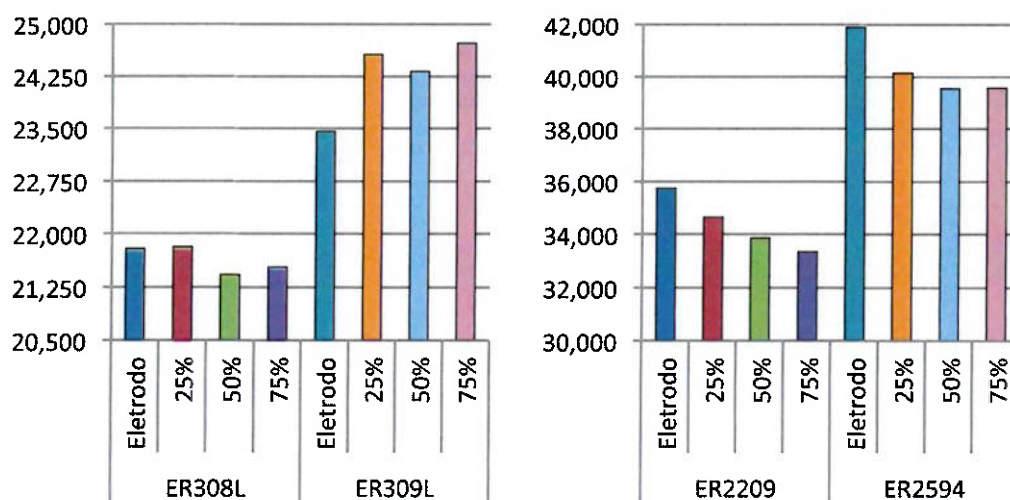


Figura 25: Valor calculado do número equivalente de resistência ao pite (PREN).

3. Medição de Ferrita- δ

Na tabela 11 são apresentados os valores da ferrita- δ obtidos da leitura dos diagramas *Schaeffler* e *WRC-1992*, e os valores das medições realizadas através do ferritoscópio; é possível notar uma grande diferença entre os valores previstos e os medidos.

Tabela 11: Valores de ferrita previstos pelos diagramas *Schaeffler* e WRC-1992 e medidos pelo ferritoscópio.

Eletrodo	Balanço	Schaeffler (%)	WRC-1992 *		Ferritoscópio (%)
			(FN)	(%)	
ER308L	25%	15,00	11	11,00	8,40
	50%	16,00	12	12,00	8,92
	75%	15,00	12	12,00	8,52
ER309L	25%	13,00	11	11,00	8,78
	50%	13,00	11	11,00	8,32
	75%	13,00	10	10,00	7,58
ER2209	25%	-	73	52,14	34,34
	50%	-	70	50,00	35,66
	75%	-	62	44,29	34,48
ER2594	25%	-	72	51,43	37,48
	50%	-	72	51,43	38,12
	75%	-	77	55,00	41,24

* O diagrama WRC-1992 apresenta o teor de ferrita previsto em número de ferrita (FN), para converter para percentagem foi utilizado um fator de 1:1 para valores menores que 28 e 1,4:1 para os demais.

O diagrama WRC-1229 apresenta o a previsão do teor de ferrita- δ em FN, enquanto que o ferritoscópio foi utilizado para medir em porcentagem. Desta forma, para converter de FN para porcentagem foi utilizado uma razão de 1:1, para valores inferiores a 28, e 1,4:1 para os demais; entretanto não há um consenso entre os pesquisadores sobre a razão de conversão [28].

Outro fator que pode causar erro na medição realizada pelo ferritoscópio é a proximidade da ponta de prova das margens da peça, que reduz o valor medido [16]. Como os corpos de prova foram cortados para a realização dos ensaios, é provável que o valor obtido seja inferior ao real.

CONCLUSÕES

- O teor de alumínio e silício no metal de solda aumenta com a elevação do balanço devido a reações de redução catódica na interface entre a poça de fusão e a escória líquida.
- A quantidade de níquel e de cromo diminui com o aumento do balanço, enquanto que o teor de oxigênio aumenta, devido a reações de oxidação anódica que ocorrem na interface entre a ponta do eletrodo e a escória líquida.
- Foi observado um aumento do conteúdo do carbono, entretanto ele não sofre reações eletroquímicas; esse aumento possivelmente é ocasionado pelo bloqueio da oxidação do carbono causado pela reação parcial do silício com gases contidos na cavidade do arco.
- Há uma diminuição no teor de nitrogênio no MS com o aumento do balanço, o que pode ser explicado pela diminuição da pressão parcial de oxigênio na cavidade do arco causada pela sua absorção por oxidação anódica.
- Não foi possível inferir o comportamento dos demais elementos, sendo necessárias maiores investigações para aumentar o espaço amostral e minimizar as incertezas.
- Foi observada a tendência de redução número equivalente de resistência ao pite com o aumento do balanço, causada pela diminuição do teor de cromo e nitrogênio no metal de solda; devendo ser tomados cuidados quando da soldagem de equipamentos expostos a condições severas de oxidação por frestas.

TRABALHOS FUTUROS

- Realizar mais experimentos para aumentar o espaço amostral possibilitando inferir sobre o comportamento de mais elementos na poça de fusão.
- Realizar a análise química das escórias e do fluxo, para determinar as reações eletroquímicas que ocorrem na poça de fusão.
- Estudar os efeitos do desvio de tensão (*offset*) na composição química do metal de solda obtido pela soldagem por arco submerso com onda quadrada de aços inoxidáveis.
- Aprofundar o estudo dos parâmetros da onda quadrada, para determinar o comprimento de arco, a impedância do circuito e a corrente elétrica em cada uma das polaridades da onda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H.; **Soldagem: Processos e Metalurgia**; 1ª Ed. São Paulo: Edigard Blücher LTDA, p. 67-75 e 133-147, 1992.
- [2] KOU, S.; **Welding Metallurgy**; 2ª Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., p. 22-24, 2003.
- [3] LINCOLN ELECTRIC.; **The Procedure Handbook of Arc Welding**; 14ª Ed. Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, p. 5.2-1 - 5.2-7, 2000.
- [4] SCHULZE, G.; **Die Metallurgie des Schweißens**; 4ª Ed. Heidelberg: Springer-Verlage, p. 363-369, 2010.
- [5] ALMQVIST, G. et al.; **Submerged-Arc Welding**; Cambridge: The Welding Institute, 1978.
- [6] LANCASTER, J. F.; **Metallurgy of Welding**; 6th Ed. Abington: Abington Publishing, p. 138, 1999.
- [7] MESLER, R. W.; **Principles of Welding**; 1ª Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [8] PARANHOS, R. P. R.; SOUZA, A. C.; **Soldagem a Arco Submerso**; 1ª Ed. Rio de Janeiro: FIRJAN 1 SENAI, 1999.
- [9] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O.; **Fundamentals of Electric Circuits**; 4ª Ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2009.
- [10] POMILIO, J. A.; **Eletrônica de Potência**; Campinas: UNICAMP, 2009.

- [11] LINCOLN ELECTRIC.; **Power Wave® AC/DC 1000® SD, MAXsa™ and Cruise™ Submerged Arc Equipment Systems**; Cleveland: Lincoln Electric, 2011.
- [12] LANCASTER, J. F.; **The Physics of Welding**; 2ª Ed. Oxford: Pergamon Press, 1986.
- [13] LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J.; **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**; New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [14] MCGUIRE, M.; **Stainless Steels for Design Engineers**; Ohio: ASM International, 2008.
- [15] VITEK, J. M.; ISKANDER, Y. S.; OBLOW, E. M. Improved Ferrite Number Prediction in Stainless Steel Arc Welds Using Artificial Neural Networks - Part 1: Neural Network Development. **Welding Research Supplement**, fev. 2000.
- [16] BERMEJO, M. A. V. Predictive and Measurement Methods for Delta Ferrite Determination in Stainless Steels. **Welding Journal**, abr. 2012.
- [17] KOTECKI, D. J.; SIEWERT, T. A. WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 diagram. **Welding Journal**, 1992.
- [18] SIEWERT, T. A.; MCCOWAN, C. N.; OLSON, D. L. Ferrite Number Prediction to 100 FN in Stainless Steel Welds. **Metallurgical Transactions**, 1988.

- [19] EUROCODE 3.; **Design of Steel Structures. Part 1.4: General Rules - Supplementary Rules for Stainless Steel**; Bruxelles: European Communities for Standardisation, 1996.
- [20] DI SARNO, L.; ELNASHAI, A. S.; NETHERCOT, D. A. Seismic Performance Assessment of Stainless Steel Frames. **Journal of Constructional Steel Research**, p. 1289-1319, 2003.
- [21] AGGEN, G. et al.; **ASM Handbook, Vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**; 10^a Ed. American Society for Metals, 1990.
- [22] AMERICAN WELDING SOCIETY.; **A5.9/A5.9M - Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods**; New York: AWS, 2006.
- [23] GRONG, Ø.; **Metallurgical Modelling of Welding**; 2^a Ed. Cambridge: The University Press, 1997.
- [24] KIM, J. H. et al. Effect of Electrochemical Reactions on Submerged Arc Weld Metal Compositions. **Welding Journal**, dez. 1990.
- [25] CHAI, C. S.; EAGAR, T. W. Slag-Metal Equilibrium During Submerged Arc Welding. **Metallurgical Transactions B**, v. 12B, set. 1981.
- [26] PALMER, T. A.; DEBROY, T. Enhanced Dissolution of Nitrogen During Gas Tungsten Arc Welding of Steels. **Science and Technology of Welding and Joining**, 1998.

- [27] AMERICAN WELDING SOCIETY.; **A5.23/A5.23M - Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding**; New York: AWS, 2007.
- [28] KOTECKI, D. J. Ferrite Determination in Stainless Steel Welds – Advances since 1974. **Welding Journal**, 1997.

APÊNDICE A – Análise dos Dados de Composição Química

Teor dos Elementos – ER308L

Balanço = 25%													
Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Nb
1	0,0243	0,7855	0,0061	0,0215	1,9993	8,7534	19,4929	0,2826	0,0372	0,1541	0,0209	0,0036	0,0041
2	0,0257	0,7798	0,0075	0,0256	1,9507	8,9198	19,6013	0,2811	0,0358	0,1580	0,0211	0,0035	0,0038
3	0,0258	0,7571	0,0077	0,0261	1,9399	8,9770	19,6965	0,2800	0,0351	0,1601	0,0212	0,0035	0,0039
4	0,0261	0,7001	0,0079	0,0259	1,9327	9,0492	19,7302	0,2782	0,0346	0,1596	0,0207	0,0034	0,0030
5	0,0250	0,7036	0,0078	0,0264	1,9167	9,0854	19,7795	0,2754	0,0339	0,1603	0,0209	0,0034	0,0029
Média	0,0254	0,7452	0,0074	0,0251	1,9478	8,9569	19,6601	0,2795	0,0353	0,1584	0,0210	0,0035	0,0035
Desvio	0,0007	0,0410	0,0007	0,0020	0,0313	0,1306	0,1139	0,0028	0,0013	0,0026	0,0002	0,0001	0,0005
Balanço = 50%													
Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Nb
1	0,0248	0,8592	0,0046	0,0204	2,0346	8,6216	19,3481	0,2868	0,0382	0,1513	0,0210	0,0039	0,0048
2	0,0261	0,9046	0,0039	0,0187	2,0638	8,5425	19,2609	0,2879	0,0390	0,1494	0,0209	0,0041	0,0053
3	0,0273	0,8883	0,0046	0,0207	2,0586	8,6508	19,4349	0,2869	0,0380	0,1540	0,0205	0,0040	0,0052
4	0,0251	0,8805	0,0048	0,0195	2,0248	8,6487	19,4408	0,2894	0,0386	0,1526	0,0213	0,0040	0,0054
5	0,0253	0,9199	0,0028	0,0156	2,0855	8,4562	19,1971	0,2916	0,0401	0,1474	0,0213	0,0041	0,0059
Média	0,0257	0,8905	0,0041	0,0190	2,0534	8,5840	19,3364	0,2885	0,0388	0,1509	0,0210	0,0040	0,0053
Desvio	0,0010	0,0232	0,0008	0,0020	0,0242	0,0839	0,1071	0,0020	0,0008	0,0026	0,0003	0,0001	0,0004
Balanço = 75%													
Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Nb
1	0,0266	0,8398	0,0036	0,0163	2,0457	8,8035	19,5129	0,2816	0,0354	0,1531	0,0207	0,0039	0,0048
2	0,0279	0,8451	0,0032	0,0169	2,0373	8,7327	19,4932	0,2810	0,0369	0,1519	0,0206	0,0038	0,0047
3	0,0273	0,8340	0,0040	0,0187	2,0179	8,7952	19,5771	0,2780	0,0359	0,1538	0,0206	0,0038	0,0041
4	0,0279	0,8289	0,0043	0,0191	2,0053	8,8277	19,6312	0,2797	0,0359	0,1558	0,0206	0,0038	0,0043
5	0,0258	0,8747	0,0030	0,0158	2,0641	8,6581	19,4615	0,2818	0,0373	0,1501	0,0206	0,0039	0,0047
Média	0,0271	0,8445	0,0036	0,0174	2,0340	8,7635	19,5352	0,2804	0,0363	0,1530	0,0206	0,0038	0,0045
Desvio	0,0009	0,0179	0,0005	0,0015	0,0231	0,0685	0,0683	0,0016	0,0008	0,0021	0,0000	0,0001	0,0003
p-valor (Teste t de Student)													
Amostras													
25%-50%	0,5227	0,0004	0,0002	0,0015	0,0004	0,0011	0,0017	0,0005	0,0015	0,0018	0,7949	0,0001	0,0004
25%-75%	0,0115	0,0033	0,0000	0,0002	0,0014	0,0259	0,0763	0,5310	0,2036	0,0070	0,0132	0,0007	0,0103
50%-75%	0,0554	0,0088	0,2684	0,1926	0,2308	0,0064	0,0105	0,0001	0,0011	0,2153	0,0502	0,0209	0,0059

Teor dos Elementos – ER309L

Balanço = 25%

Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al	Nb
1	0,0208	0,6416	0,0071	0,0195	1,7861	13,0549	23,2935	0,1069	0,0358	0,0354	0,0153	0,0038	0,0030	0,0107	0,0051
2	0,0233	0,7753	0,0021	0,0100	1,9592	12,2645	22,6346	0,1080	0,0418	0,0355	0,0156	0,0045	0,0028	0,0166	0,0077
3	0,0216	0,6727	0,0057	0,0164	1,8197	12,8988	23,2262	0,1062	0,0373	0,0353	0,0148	0,0040	0,0029	0,0116	0,0057
4	0,0240	0,6973	0,0045	0,0142	1,8559	12,7875	23,1902	0,1071	0,0387	0,0340	0,0155	0,0040	0,0030	0,0145	0,0058
5	0,0218	0,6972	0,0041	0,0135	1,8517	12,7291	23,1394	0,1071	0,0388	0,0343	0,0152	0,0041	0,0029	0,0126	0,0059
Média	0,0223	0,6968	0,0047	0,0147	1,8545	12,7469	23,0968	0,1071	0,0385	0,0349	0,0153	0,0041	0,0029	0,0132	0,0060
Desvio	0,0013	0,0495	0,0019	0,0035	0,0649	0,2969	0,2644	0,0006	0,0022	0,0007	0,0003	0,0003	0,0001	0,0024	0,0010

Balanço = 50%

Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al	Nb
1	0,0209	0,7161	0,0049	0,0166	1,8518	12,6182	22,8761	0,1048	0,0373	0,0378	0,0152	0,0040	0,0030	0,0147	0,0056
2	0,0200	0,7710	0,0031	0,0134	1,9192	12,3073	22,6794	0,1058	0,0392	0,0378	0,0148	0,0042	0,0029	0,0138	0,0060
3	0,0251	0,7953	0,0022	0,0111	1,9365	12,2423	22,6523	0,1074	0,0404	0,0374	0,0153	0,0044	0,0029	0,0180	0,0068
4	0,0252	0,7303	0,0056	0,0177	1,8462	12,7343	23,0194	0,1047	0,0364	0,0387	0,0152	0,0040	0,0030	0,0119	0,0056
5	0,0236	0,6983	0,0066	0,0201	1,8090	12,9007	23,1506	0,1038	0,0352	0,0391	0,0154	0,0039	0,0031	0,0115	0,0051
Média	0,0230	0,7422	0,0045	0,0158	1,8725	12,5605	22,8756	0,1053	0,0377	0,0382	0,0152	0,0041	0,0030	0,0140	0,0058
Desvio	0,0024	0,0400	0,0018	0,0035	0,0534	0,2805	0,2149	0,0014	0,0021	0,0007	0,0002	0,0002	0,0001	0,0026	0,0006

Balanço = 75%

Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al	Nb
1	0,0223	0,7391	0,0041	0,0168	1,8088	12,4748	22,5753	0,1032	0,0359	0,0395	0,0139	0,0039	0,0029	0,0156	0,0048
2	0,0257	0,7853	0,0029	0,0126	1,9136	12,0628	22,3672	0,1084	0,0413	0,0433	0,0194	0,0056	0,0033	0,0253	0,0064
3	0,0244	0,7888	0,0020	0,0112	1,8851	12,1806	22,4869	0,1062	0,0392	0,0413	0,0163	0,0043	0,0031	0,0214	0,0072
4	0,0252	0,8959	0,0020	0,0135	1,9826	11,7939	22,0582	0,1092	0,0440	0,0423	0,0207	0,0053	0,0033	0,0365	0,0106
5	0,0262	0,8437	0,0011	0,0109	1,9293	11,8208	22,0581	0,1059	0,0406	0,0433	0,0167	0,0046	0,0031	0,0224	0,0083
Média	0,0247	0,8106	0,0024	0,0130	1,9039	12,0666	22,3091	0,1066	0,0402	0,0419	0,0174	0,0047	0,0031	0,0242	0,0075
Desvio	0,0015	0,0604	0,0011	0,0024	0,0639	0,2803	0,2407	0,0023	0,0030	0,0016	0,0027	0,0007	0,0002	0,0077	0,0022

Amostras

p-valor (Teste t de Student)

25%-50%	0,6027	0,1512	0,8522	0,6417	0,6451	0,3374	0,1862	0,0409	0,5907	0,0001	0,5814	0,9060	0,2147	0,6364	0,7390
25%-75%	0,0260	0,0122	0,0542	0,3958	0,2602	0,0059	0,0012	0,6620	0,3300	0,0002	0,1492	0,1084	0,0536	0,0301	0,2315
50%-75%	0,2032	0,0732	0,0697	0,1853	0,4254	0,0237	0,0045	0,3355	0,1685	0,0036	0,1352	0,1133	0,1687	0,0381	0,1745

Teor dos Elementos - ER2209

Balanço = 25%													
Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Nb
1	0,0157	0,5563	0,0018	0,0157	1,3088	8,2459	22,8726	3,0420	0,0637	0,1425	0,0275	0,0021	0,0075
2	0,0155	0,5495	0,0014	0,0187	1,2768	8,3160	22,9180	3,0077	0,0622	0,1449	0,0277	0,0019	0,0065
3	0,0155	0,5465	0,0013	0,0180	1,2866	8,3206	23,0051	2,9908	0,0630	0,1467	0,0284	0,0020	0,0073
4	0,0148	0,5734	0,0011	0,0141	1,3209	8,1181	22,7384	3,0772	0,0655	0,1402	0,0277	0,0021	0,0079
5	0,0168	0,5787	0,0016	0,0139	1,3023	8,1446	22,7993	3,0748	0,0650	0,1407	0,0276	0,0021	0,0081
Média	0,0156	0,5609	0,0014	0,0161	1,2991	8,2290	22,8667	3,0385	0,0639	0,1430	0,0278	0,0020	0,0075
Desvio	0,0007	0,0144	0,0003	0,0022	0,0176	0,0944	0,1035	0,0389	0,0013	0,0028	0,0003	0,0001	0,0006

Balanço = 50%

Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al	Nb
1	0,0138	0,5586	0,0010	0,0171	1,2573	8,2116	22,4829	2,9073	0,0626	0,1414	0,0277	0,0021	0,0049	0,0293	0,0070
2	0,0137	0,5498	0,0009	0,0160	1,2405	8,2867	22,5836	2,9287	0,0617	0,1410	0,0271	0,0021	0,0049	0,0270	0,0067
3	0,0136	0,5561	0,0012	0,0146	1,2561	8,2257	22,5777	2,9500	0,0627	0,1406	0,0271	0,0021	0,0049	0,0278	0,0072
4	0,0142	0,5233	0,0017	0,0187	1,2229	8,4362	22,7692	2,8481	0,0590	0,1465	0,0273	0,0020	0,0050	0,0244	0,0064
5	0,0139	0,5385	0,0011	0,0172	1,2457	8,3450	22,5518	2,8974	0,0606	0,1426	0,0276	0,0021	0,0049	0,0264	0,0068
Média	0,0138	0,5453	0,0012	0,0167	1,2445	8,3010	22,5931	2,9063	0,0613	0,1424	0,0273	0,0021	0,0049	0,0270	0,0068
Desvio	0,0002	0,0145	0,0003	0,0015	0,0140	0,0923	0,1063	0,0383	0,0015	0,0024	0,0003	0,0000	0,0000	0,0018	0,0003

Balanço = 75%

Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al	Nb
1	0,0195	0,6074	0,0014	0,0187	1,1741	8,2564	22,2436	2,8170	0,0613	0,1413	0,0281	0,0026	0,0050	0,0359	0,0070
2	0,0188	0,6262	0,0018	0,0168	1,2023	8,3573	22,3853	2,7655	0,0595	0,1428	0,0279	0,0038	0,0048	0,0364	0,0079
3	0,0216	0,5526	0,0020	0,0200	1,1689	8,4902	22,5625	2,7203	0,0572	0,1462	0,0273	0,0024	0,0050	0,0301	0,0061
4	0,0187	0,5913	0,0015	0,0143	1,2019	8,1780	22,3143	2,8373	0,0610	0,1397	0,0266	0,0026	0,0048	0,0291	0,0074
5	0,0178	0,6576	0,0011	0,0095	1,2291	8,1433	22,2235	2,9620	0,0641	0,1392	0,0335	0,0060	0,0055	0,0302	0,0097
Média	0,0193	0,6070	0,0016	0,0158	1,1953	8,2850	22,3458	2,8204	0,0606	0,1418	0,0287	0,0035	0,0050	0,0323	0,0076
Desvio	0,0014	0,0392	0,0003	0,0041	0,0244	0,1412	0,1369	0,0914	0,0026	0,0028	0,0027	0,0015	0,0003	0,0035	0,0013

p-valor (Teste t de Student)

Amostras															
25%-50%	0,0036	0,1261	0,2500	0,6184	0,0007	0,2575	0,0033	0,0006	0,0223	0,7316	0,0540	0,1996	0,0393	0,8324	0,0838
25%-75%	0,0024	0,0559	0,5226	0,9123	0,0001	0,4849	0,0002	0,0036	0,0446	0,5387	0,5077	0,1032	0,9172	0,0284	0,8119
50%-75%	0,0009	0,0209	0,1120	0,6786	0,0070	0,8382	0,0138	0,1063	0,6197	0,7483	0,3381	0,1122	0,4601	0,0238	0,2417

Teor dos Elementos – ER2594

Balanço = 25%

Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al	Nb
1	0,0180	0,4847	0,0013	0,0201	0,2694	9,1625	25,0562	3,7800	0,0447	0,1085	0,0306	0,0019	0,0040	0,0262	0,0077
2	0,0197	0,4863	0,0014	0,0185	0,2710	9,1186	25,0289	3,8285	0,0453	0,1081	0,0300	0,0019	0,0039	0,0263	0,0082
3	0,0213	0,4728	0,0014	0,0207	0,2692	9,2536	25,1384	3,7495	0,0438	0,1102	0,0308	0,0020	0,0040	0,0247	0,0077
4	0,0196	0,4817	0,0010	0,0180	0,2682	9,1121	25,0391	3,8401	0,0450	0,1073	0,0302	0,0019	0,0038	0,0260	0,0077
5	0,0196	0,4621	0,0012	0,0200	0,2684	9,2632	25,1555	3,7575	0,0436	0,1104	0,0300	0,0019	0,0040	0,0228	0,0074
Média	0,0196	0,4775	0,0012	0,0195	0,2692	9,1820	25,0836	3,7911	0,0445	0,1089	0,0303	0,0019	0,0039	0,0252	0,0077
Desvio	0,0012	0,0101	0,0002	0,0011	0,0011	0,0724	0,0589	0,0412	0,0008	0,0014	0,0004	0,0000	0,0001	0,0015	0,0003

Balanço = 50%

Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al	Nb
1	0,0169	0,4955	0,0017	0,0212	0,2581	9,2553	24,9283	3,7144	0,0436	0,1087	0,0300	0,0018	0,0040	0,0252	0,0071
2	0,0162	0,4919	0,0015	0,0210	0,2505	9,2135	24,9146	3,7444	0,0436	0,1082	0,0301	0,0018	0,0039	0,0238	0,0073
3	0,0157	0,5202	0,0015	0,0173	0,2560	9,3480	24,4096	3,7981	0,0471	0,1094	0,0290	0,0018	0,0034	0,0238	0,0077
4	0,0153	0,5154	0,0013	0,0194	0,2617	9,0902	24,7317	3,7862	0,0459	0,1075	0,0306	0,0018	0,0034	0,0249	0,0077
5	0,0186	0,5130	0,0011	0,0219	0,2610	9,1619	24,7952	3,7183	0,0455	0,1107	0,0310	0,0019	0,0031	0,0235	0,0075
Média	0,0165	0,5072	0,0014	0,0202	0,2575	9,2138	24,7559	3,7523	0,0451	0,1089	0,0301	0,0018	0,0035	0,0242	0,0075
Desvio	0,0013	0,0127	0,0002	0,0018	0,0045	0,0971	0,2103	0,0384	0,0015	0,0012	0,0008	0,0000	0,0004	0,0007	0,0003

Balanço = 75%

Amostra	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W	Ti	Sn	Al	Nb
1	0,0219	0,6205	0,0013	0,0090	0,2606	8,6577	24,0929	4,0538	0,0504	0,0994	0,0303	0,0025	0,0038	0,0362	0,0102
2	0,0188	0,6062	0,0012	0,0090	0,2620	8,6737	24,1117	4,0712	0,0500	0,0990	0,0301	0,0023	0,0038	0,0356	0,0103
3	0,0198	0,5957	0,0011	0,0095	0,2690	8,7085	24,1531	4,0006	0,0492	0,1006	0,0297	0,0022	0,0038	0,0336	0,0100
4	0,0185	0,5393	0,0017	0,0176	0,2565	9,1132	24,5583	3,7789	0,0442	0,1064	0,0294	0,0019	0,0038	0,0262	0,0076
5	0,0183	0,5718	0,0015	0,0117	0,2654	8,8299	24,3092	3,9586	0,0476	0,1009	0,0285	0,0021	0,0038	0,0324	0,0094
Média	0,0194	0,5867	0,0013	0,0113	0,2627	8,7966	24,2450	3,9726	0,0483	0,1012	0,0296	0,0022	0,0038	0,0328	0,0095
Desvio	0,0015	0,0319	0,0002	0,0036	0,0048	0,1894	0,1947	0,1171	0,0025	0,0030	0,0007	0,0002	0,0000	0,0040	0,0011

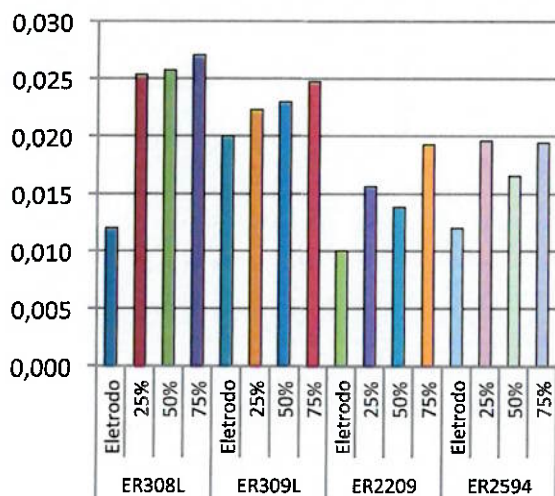
Amostras

p-valor

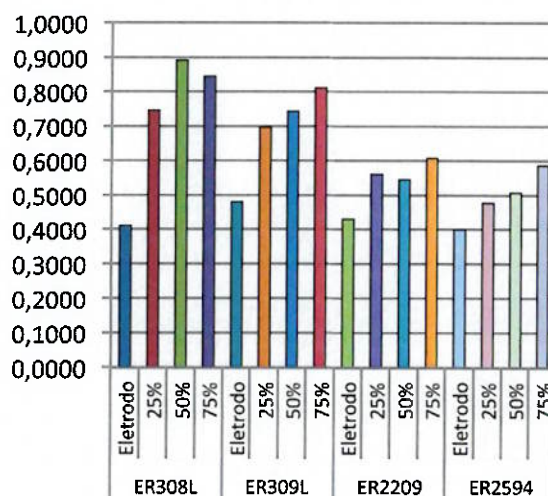
25%-50%	0,0045	0,0038	0,2295	0,4845	0,0034	0,5749	0,0228	0,1618	0,4151	0,9695	0,6246	0,0030	0,0885	0,2434	0,1651
25%-75%	0,8309	0,0009	0,4365	0,0058	0,0357	0,0076	0,0003	0,0223	0,0252	0,0024	0,0846	0,0557	0,0036	0,0098	0,0232
50%-75%	0,0122	0,0031	0,6855	0,0030	0,1117	0,0047	0,0041	0,0110	0,0508	0,0026	0,2911	0,0242	0,2467	0,0076	0,0142

APÊNDICE B – Gráficos da Variação da Composição Química (%)

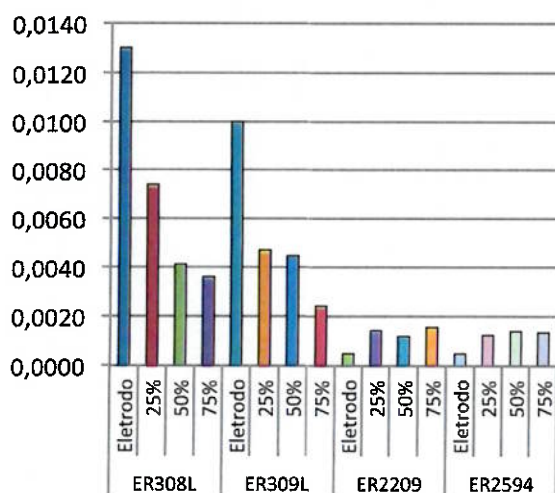
Carbono



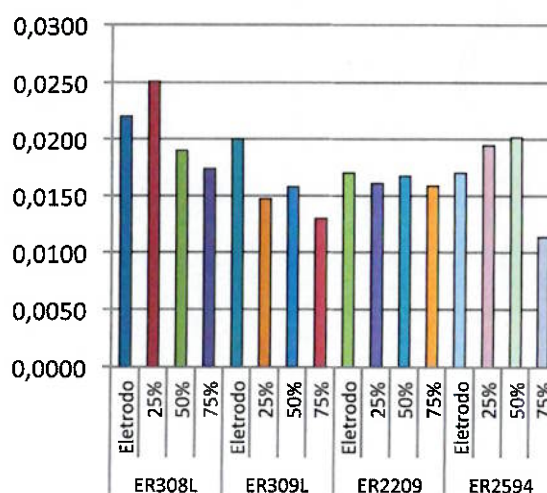
Silício



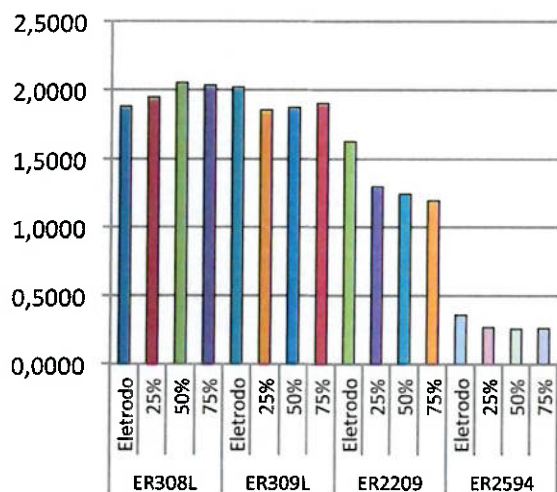
Enxofre



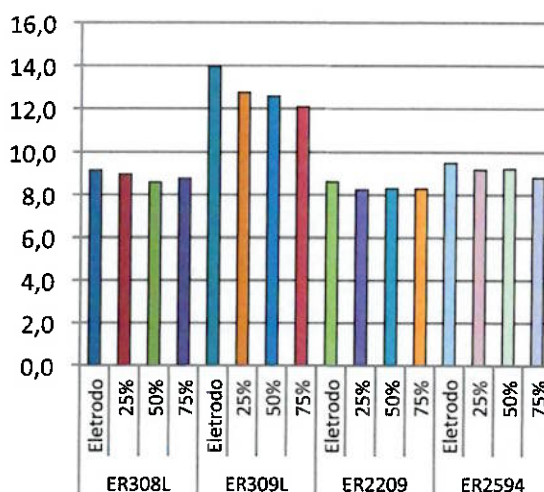
Fósforo

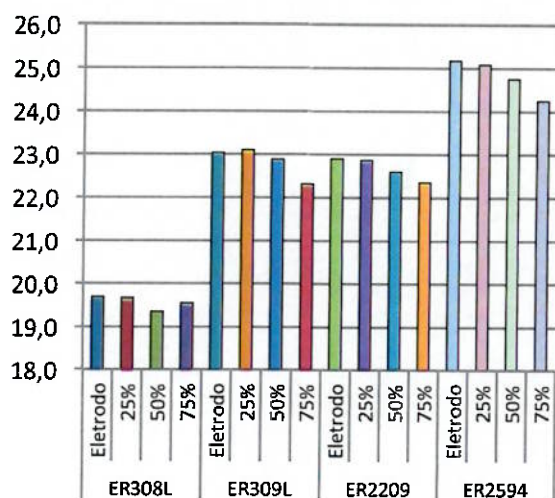
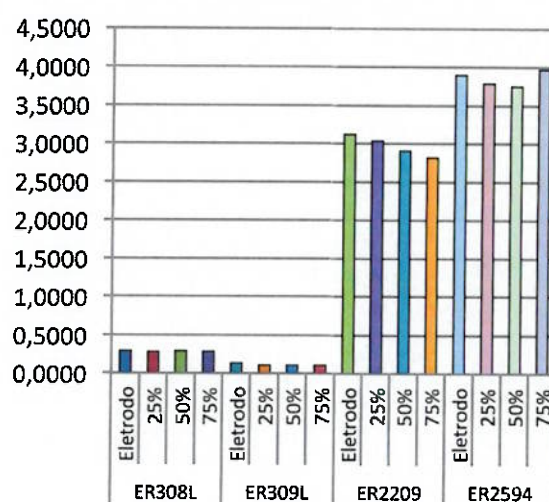
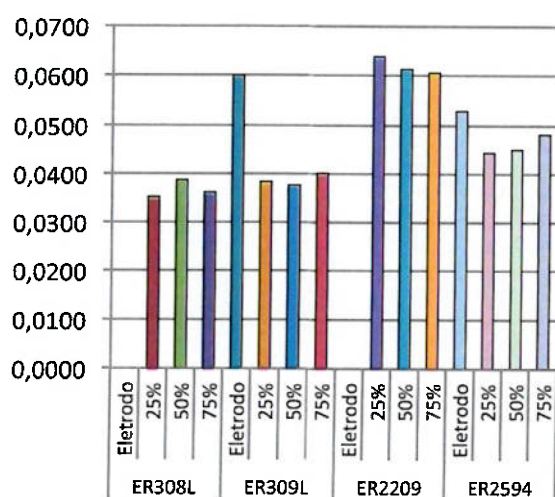
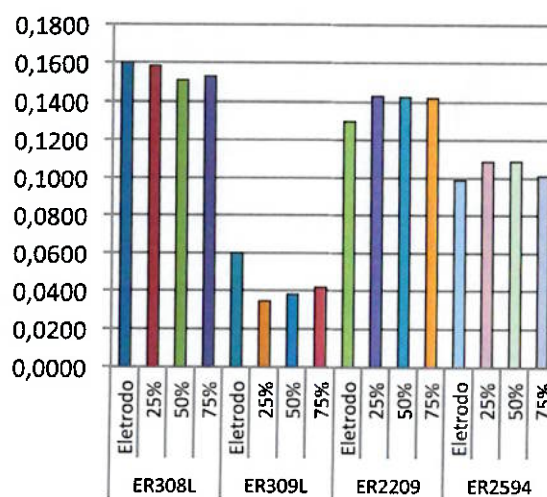
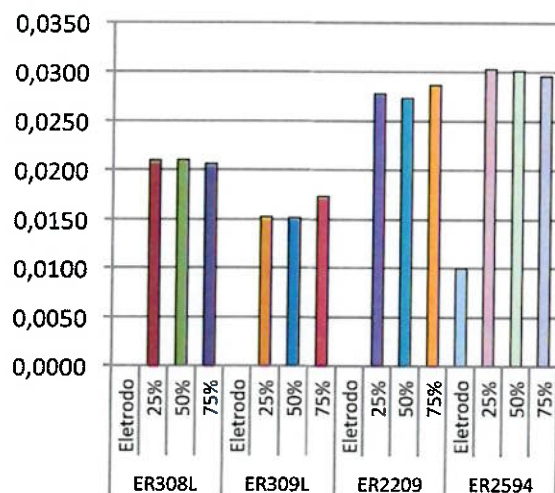
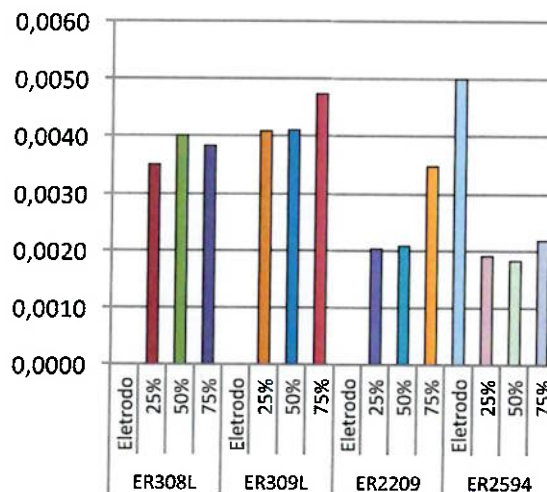


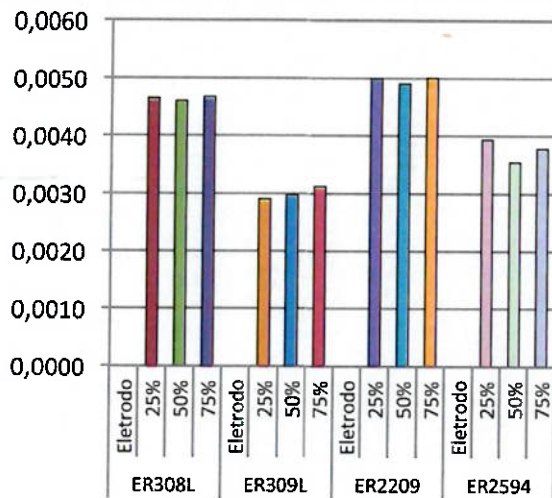
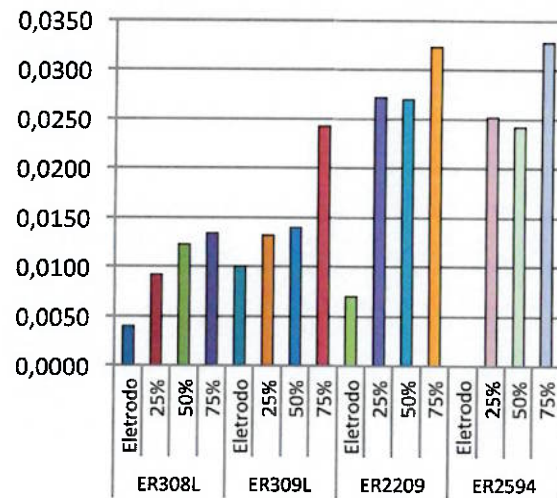
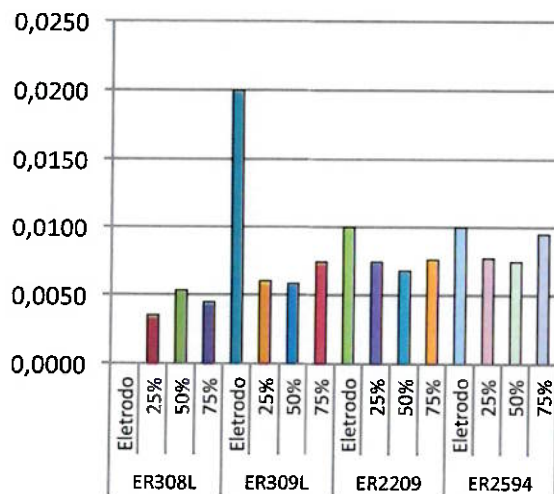
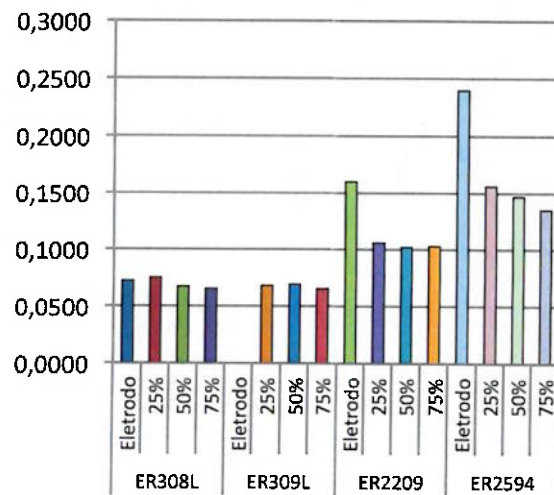
Manganês



Níquel



Cromo**Molibdênio****Vanádio****Cobre****Tungstênio****Titânio**

Estanho**Alumínio****Nióbio****Nitrogênio****Oxigênio**