

Karine d'Avila Zaccari

**ESTUDO DOS EFEITOS NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA COM UMA
VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA NA ONDA QUADRADA EM CORRENTE
ALTERNADA PARA SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO DE
CONSUMÍVEIS ER308L, ER309L, ER2209 E ER2594**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Março/2013

Karine d'Avila Zaccari

(Engenheira Química, Faculdades Oswaldo Cruz, 2010)

**ESTUDO DOS EFEITOS NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA COM UMA
VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA NA ONDA QUADRADA EM CORRENTE
ALTERNADA PARA SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO DE
CONSUMÍVEIS ER308L, ER309L, ER2209 E ER2594**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sergio Duarte Brandi

São Paulo

Março/2013

O que vale não é o quanto se vive...mas como se vive.

Martin Luther King

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Orientador Sergio Duarte Brandi, por toda dedicação, paciência na orientação deste trabalho.

As empresas Lincoln Electric do Brasil e Proact, pela colaboração na confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios mecânicos. Em especial a: Antonio Cordeiro de Souza, Hélio Macedo, Ricardo Pedro, Fernando Felício Zimmermann, Carlos Alberto Faggiani e André Albuquerque Vicente.

A todos meus amigos e familiares que compreenderam os momentos que não pude dar-lhes atenção e que me incentivaram na realização deste trabalho.

CURRICULUM VITAE

Escolaridade:

Universidade de São Paulo – Escola Politécnica

PECE – Programa de Educação Continuada

Engenharia Química (conclusão março / 2013)

Faculdade Oswaldo Cruz

Engenharia Química (conclusão dezembro / 2010)

Escola Técnica Estadual Getúlio Vargas

Ensino Médio (conclusão dezembro / 2005)

Curso Técnica – Química (conclusão junho / 2005)

Cursos:

Wizard

Espanhol – Intermediário (cursando)

Alemão - Básico (concluído)

Cultura Inglesa

Inglês – Avançado (concluído)

SENAI

Matérias – Primas para a Indústria Cerâmica – On-line (concluído)

Tecnologia em Soldagem – 36 horas (09/2008)

AutoCAD 2D – 40 horas (conclusão 12/2007)

Experiências Anteriores

Lincoln Electric do Brasil Ltda.

Engenheira de Produtos - Consumíveis (01/12 – até a presente data)

Engenheira Trainee (05/11 – 12/11)

Analista de Processo Jr. (11/10 –05/11)

Analista de Desenvolvimento Jr. (04/08 – 11/10)

Estagiaria em Eng. Química - Pesquisa e Desenvolvimento (11/07 a 04/08)

Studio Bass Cosméticos Ltda ME

Técnica em Química – Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento (11/12/06 a 02/04/07)

Copaster Indústria Comércio Envasadora de Produtos Químicos Ltda

Estagiária de Engenharia Química – Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento (13/03/06 a 11/12/06)

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT

Estagiário – Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes (09/05 a 11/05)

RESUMO

Um ponto muito importante em um processo de soldagem é a avaliação da composição química obtida no metal de solda, uma vez que está pode ser influenciada por diversos fatores e interferir nas propriedades finais da solda. Desta maneira desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de estudar através do processo de arco submerso com a tecnologia de controle de onda quadrada a variação na composição química do metal de solda. Para isso foi escolhido promover uma variação de frequência na onda em três valores: 20Hz, 70Hz e 100Hz, de maneira a se avaliar o maior e menor valor possível e um intermediário. O metal de base estudado é AISI 304L e como este pode ser soldado com uma grande variedade de consumíveis, determinou-se 4 diferentes aços inoxidáveis para estudo, conforme classificados pela AWS 5.9. Sendo eles: ER308L, ER309L, ER2209 e ER2594. Entretanto para esses materiais com a variação de frequência não foi possível observar grande influência nos resultados químicos.

Palavras-chave: soldagem por arco submerso, aço inoxidável, frequência na onda quadrada.

ABSTRACT

A very important point in the welding process is the evaluations of chemical composition obtained in the weld metal, once this can be influenced by various factors and interfere in the final properties of the weld. Thus this was developed with the objective of study through the process of submerged arc with the square-wave technology the variation in the chemical composition of the weld metal. To do this was chosen change the frequency wave on three values: 20Hz, 70Hz and 100Hz in order to evaluate the highest and lowest possible value and an intermediate. The base metal used was AISI 304L and how it can be welded with a wide variety of consumable it was chosen for four different stainless steels to study, all classified by AWS 5.9. They are: ER308L, ER309L, ER2209 and ER2594. However for these materials with the frequency variation was not possible to observe large influence on the chemicals results of weld metal.

Key-words: submerged arc welding, stainless steel, the square wave frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Seção vertical do diagrama ternário Fe-Cr-Ni com 18% de Cr, válido para teor de C inferior a 0,03%.....	7
Figura 2.2 – Projeções das superfícies “liquidus” (a) e “solidus” (b), como contornos isotérmicos no diagrama ternário do Fe-Ni-Cr. Temperatura expressa em °F.....	11
Figura 2.3 – O esquema mostra a solidificação e as transformações pós-solidificação nas soldagens Fe-Cr-Ni: (a) ferrita interdendrítica; (b) ferrita vermicular (c) ferrita acicular (d) seção vertical do diagrama de fase ternário de aproximadamente 70%Fe.....	12
Figura 2.4 – Efeito do Nitrogênio no teor de ferrita na soldagem GTAW em aço inoxidável duplex.....	14
Figura 2.5 – Efeito da adição de Ni.....	17
Figura 2.6 – A partir da adição de Ni na liga altera-se a estrutura do material.....	18
Figura 2.7 – Seção do diagrama ternário Fe-Cr-Ni com teor de 68% Fe.....	19
Figura 2.8 – Diagrama de Maurer, versão de 1939.....	21
Figura 2.9 – Diagrama de Schaeffler, versão 1949.....	22
Figura 2.10 – Diagrama de DeLong, versão de 1973.....	23
Figura 2.11 – Diagrama WRC-1988.....	24
Figura 2.12 – Diagrama WRC-1992.....	25
Figura 2.13 – Regiões de um arco elétrico de soldagem (esquemáticas): (a) Zona de queda catódica, (b) Coluna do arco, (c) Zona de queda anódica e l_a comprimento do arco.....	30

Figura 2.14 – Equilíbrio de concentração para O, N e H Diagrama WRC-1988.....	35
Figura 2.15 – Equilíbrio de desoxidação para ligas de ferro a 1600°C.....	37
Figura 2.16 – Relação entre resultados no teste de impacto a -20°C e a concentração de Oxigênio no metal de solda.....	38
Figura 2.17 – Diagrama de energia livre padrão para a formação de alguns óxidos comuns.....	39
Figura 2.18 – Esse esquema demonstra a composição do sólido e líquido modelado pela Equação de Scheil. Assumindo que haja uma difusão completa na fase líquida e isento de difusão no sólido.....	42
Figura 2.19 – Concentração de Oxigênio no arame de solda, na ponta do eletrodo e nas gotas de metal líquido em ambas as polaridades.....	44
Figura 2.20 – Concentração de Si quando o eletrodo está no negativo e no positivo.....	45
Figura 2.21 – Concentração de Mn quando o eletrodo está no negativo e no positivo.....	46
Figura 2.22 – Concentração de Oxigênio em função do índice de basicidade do fluxo.....	52
Figura 2.23 – Esquema de soldagem por arco submerso.....	54
Figura 2.24 – Influência de cada parâmetro da onde quadrada.....	61
Figura 2.25 – Corrente DC+ e DC-.....	61
Figura 2.26 – Efeito do balance da onda na penetração e taxa de deposição...62	
Figura 2.27 – Controle de penetração e taxa de deposição através do offset...63	
Figura 2.28 – Controle da frequência de onda.....	64

Figura 4.1 – Conjunto Power Wave AC/DC 1000SD (esquerda) e cabeçote MAXsa 10 (direita).....	65
Figura 4.2 – Esquema do ' <i>weld pad</i> ' para soldagem a arco submerso.....	67
Figura 5.1 - Comparação dos resultados médios para o arame ER308L.....	75
Figura 5.2 - Comparação das variações entre as 5 análises realizadas para cada frequência.....	76
Figura 5.3 - Comparação dos resultados médio nas 3 frequências utilizadas com a composição do arame ER308L soldado.....	77
Figura 5.4 - Comparação dos resultados médios para o arame ER309L.....	81
Figura 5.5 - Comparação das variações entre as 5 análises realizadas para cada frequência.....	82
Figura 5.6- Comparação dos resultados médio nas 3 frequências utilizadas com a composição do arame ER309L soldado.....	83
Figura 5.7 - Comparação dos resultados médios para o arame ER2209.....	87
Figura 5.8 - Comparação das variações entre as 5 análises realizadas para cada frequência.....	88
Figura 5.9- Comparação dos resultados médio nas 3 frequências utilizadas com a composição do arame ER2209 soldado.....	90
Figura 5.10 - Comparação dos resultados médios para o arame ER2594.....	94
Figura 5.11 - Comparação das variações entre as 5 análises realizadas para cada frequência.....	95
Figura 5.12- Comparação dos resultados médio nas 3 frequências utilizadas com a composição do arame ER2209 soldado.....	97

Figura 5.13 - Comparação do teor de ferrita teórico com o medido para ER308L.....	100
Figura 5.14 - Gráfico WRC-1992 para ER308L com 20Hz.....	101
Figura 5.15 - Gráfico WRC-1992 para ER308L com 70Hz.....	101
Figura 5.16 - Gráfico WRC-1992 para ER308L com 100Hz.....	101
Figura 5.17 - Comparação do teor de ferrita teórico com o medido para ER309L.....	102
Figura 5.18 - Gráfico WRC-1992 para ER309L com 20Hz.....	103
Figura 5.19 - Gráfico WRC-1992 para ER309L com 70Hz.....	103
Figura 5.20 - Gráfico WRC-1992 para ER309L com 100Hz.....	103
Figura 5.21 - Comparação do teor de ferrita teórico com o medido para ER2209.....	104
Figura 5.22 - Gráfico WRC-1992 para ER2209 com 20Hz.....	105
Figura 5.23 - Gráfico WRC-1992 para ER2209 com 70Hz.....	105
Figura 5.24 - Gráfico WRC-1992 para ER2209 com 100Hz.....	105
Figura 5.25 - Comparação do teor de ferrita teórico com o medido para ER2594.....	106
Figura 5.26 - Gráfico WRC-1992 para ER2594 com 20Hz.....	107
Figura 5.27 - Gráfico WRC-1992 para ER2594 com 70Hz.....	107
Figura 5.28 - Gráfico WRC-1992 para ER2594 com 100Hz.....	107
Figura 5.29 - Gráfico com os teores de Oxigênio para todos os arames.....	109
Figura 5.30 - Gráfico com os teores de Nitrogênio para todos os arames.....	110
Figura 5.31 - Gráfico comparativo com o Nitrogênio inicial do arame.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição Química (% em peso) e característica de alguns aços inoxidáveis austeníticos	6
Tabela 2.2 – Efeitos dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos.....	9
Tabela 2.3 – Efeitos dos elementos dos gases na soldagem	33
Tabela 4.1 – Composição química do metal de base.....	66
Tabela 4.2 – Composição química dos arames utilizados	66
Tabela 4.3 - Valores de corrente e velocidade de deslocamento utilizados.....	68
Tabela 5.1 - Composição química dos weld pads com ER308L para frequência 20Hz.....	72
Tabela 5.2 - Composição química dos weld pads com ER308L para frequência 70Hz.....	73
Tabela 5.3 - Composição química dos 'weld pads' com ER308L para frequência 100Hz.....	74
Tabela 5.4 - Comparação dos resultados médios nas três frequências para o arame ER308L.....	75
Tabela 5.5 – Comparação das variações para cada elementos químico entre as cinco análises realizadas nas três frequências para o arame ER308L.....	76
Tabela 5.6 - Composição química dos weld pads com ER309L para frequência 20Hz.....	78
Tabela 5.7 - Composição química dos weld pads com ER309L para frequência 70Hz.....	79

Tabela 5.8 - Composição química dos weld pads com ER309L para frequência 100Hz.....	80
Tabela 5.9 - Comparação dos resultados médios nas três frequências para o arame ER309L.....	81
Tabela 5.10 - Comparação das variações para cada elementos químico entre as cinco análises realizadas nas três frequências para o arame ER309L.....	82
Tabela 5.11 - Composição química dos weld pads com ER2209 para frequência 20Hz.....	84
Tabela 5.12 - Composição química dos weld pads com ER2209 para frequência 70Hz.....	85
Tabela 5.13 - Composição química dos weld pads com ER2209 para frequência 100Hz.....	86
Tabela 5.14 - Comparação dos resultados médios nas três frequências para o arame ER2209.....	87
Tabela 5.15 - Comparação das variações para cada elementos químico entre as cinco análises realizadas nas três frequências para o arame ER2209.....	88
Tabela 5.16 - Composição química dos weld pads com ER2594 para frequência 20Hz.....	91
Tabela 5.17 - Composição química dos weld pads com ER2594 para frequência 70Hz.....	92
Tabela 5.18 - Composição química dos weld pads com ER2594 para frequência 100Hz.....	93
Tabela 5.19 - Comparação dos resultados médios nas três frequências para o arame ER2594.....	94

Tabela 5.20 - Comparação das variações para cada elementos químico entre as cinco análises realizadas nas três frequências para o arame ER2594.....	95
Tabela 5.21 - Resultados do teor de ferrita para o ER308L no ferritoscópio.....	99
Tabela 5.22 - Resultados do teor de ferrita para o ER308L pelo WRC-1992...	100
Tabela 5.23 - Resultados do teor de ferrita para o ER309L no ferritoscópio...	102
Tabela 5.24 - Resultados do teor de ferrita para o ER309L pelo WRC-1992...	102
Tabela 5.25 - Resultados do teor de ferrita para o ER2209 no ferritoscópio...	104
Tabela 5.26 - Resultados do teor de ferrita para o ER2209 pelo WRC-1992...	104
Tabela 5.27 - Resultados do teor de ferrita para o ER2594 no ferritoscópio...	106
Tabela 5.28 - Resultados do teor de ferrita para o ER2594 pelo WRC-1992...	106
Tabela 5.29 – Resultados de concentração de Oxigênio em ppm para os quatro arames soldados nas três frequências utilizadas.....	109
Tabela 5.30 – Resultados de concentração de Nitrogênio em ppm para os quatro arames soldados nas três frequências utilizadas.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

AWS: American Welding Society

ASTM: American Society for Testing and Materials

Hz: Hertz

CFC: cúbico de face centrada

CCC: cúbico de corpo centrado

°C: graus Celsius

°F: graus Fahrenheit

AISI: American Iron and Steel Institute

ZAC: zona afetada pelo calor

FN: número de ferrita

GTAW: gas tungsten arc welding = TIG

GMAW: gas metal arc welding = MIG/MAG

SMAW: shielded metal arc welding = ER

SAW: submerged arc welding = AS

PREN: número equivalente de resistência ao pite

WRC: Welding Research Council

IB: índice de basicidade

DC+: corrente contínua polaridade positiva

DC-: corrente contínua polaridade negativa

AC: corrente alternada

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS.....	v
CURRICULUM VITAE.....	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xvii
SUMÁRIO.....	xvii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Aços Inoxidáveis.....	3
2.2 Aços Inoxidáveis Austeníticos	5
2.2.1 Estrutura do Metal de Solda	10
2.3 Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex	15
2.3.1 Composição Química.....	16
2.3.2 Metalurgia para Aços Inoxidáveis Duplex.....	18
2.4 Diagramas Constitucionais.....	20
2.5 Soldagem.....	26
2.5.1 Ligações Químicas	28

2.5.2 Soldagem ao Arco Elétrico.....	29
2.5.3 Reações Químicas na Soldagem.....	31
2.5.3.1 Gás – Metal	32
2.5.3.2 Reação na Poça de Fusão.....	38
2.5.3.3 Formação de inclusão.....	40
2.5.3.4 Reação Eletroquímicas	42
2.5.4 Formação de Escória.....	47
2.5.4.1 Reação Metal - Escória	48
2.5.5 Classificação Química do Fluxo	49
2.5.5.1 Índice de Basicidade	50
2.6 Processo de Soldagem a Arco Submerso	53
2.6.1 Processo	54
2.6.2 Equipamento	55
2.6.3 Consumíveis	56
2.6.4 Onda Quadrada	60
3.OBJETIVO.....	64
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
4.1 Soldagem.....	65
4.1.1 Preparação do Corpo de Prova para Análise	69
4.1.2 Análises	69
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO:	71
5.1 Análises Químicas	71

5.1.1 ER308L	72
5.1.2 ER309L	78
5.1.3 ER2209	84
5.1.4 ER2594	91
5.2 Teor de Ferrita	99
5.2.1 ER308L	99
5.2.2 ER309L	102
5.2.3 ER2209	104
5.2.4 ER2594	106
5.3 Concentração de Gases.....	109
6. CONCLUSÃO.	112
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.	114
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	115

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os aços inoxidáveis têm como base principalmente sistemas de ligas Ferro-Cromo, Ferro-Cromo-Carbono, Ferro-Cromo-Níquel e Ferro-Cromo-Níquel-Molibdênio. Com os passar dos anos e as evoluções na área da metalurgia essas ligas foram sendo complementadas com outros elementos para aprimorar suas propriedades mecânicas, microestruturas e resistência à corrosão. Deixando de existir somente aquelas três classificações básicas dos inoxidáveis os martensíticos, ferríticos, austeníticos e passando a existir também os Duplex, Super Duplex e Hiper Duplex.

Esses aços são utilizados amplamente na indústria devido a sua principal características de ser resistente a corrosão, tendo, portanto, espaço na indústria petroquímica, fertilizantes, geração de energia, papel e celulose, medicina e processos químicos.

Na área da soldagem tiveram-se grandes avanços tecnológicos nos processos e equipamentos para soldagem, dentre esses se podem destacar a utilização de onda quadrada para a soldagem a arco submerso. Com esse sistema é permitido o controle da amplitude, balanço e frequência da onda quadrada, promovendo melhorias e/ou mudanças nos resultados da soldagem sem necessidade de alterar quaisquer um dos demais parâmetros do processo.

Com o intuito de estudar o efeito da onda quadrada na soldagem, este trabalho se desenvolveu em avaliar os efeitos da variação de frequência na composição química do metal de solda em 4 diferentes arames, classificados conforme AWS 5.9: ER2209, ER2594, ER308L e ER309L, todas no metal de

base 304L e soldados com fluxo neutro para proteção da poça de fusão. Fluxo Lincoln/Carboox MU para série 300 e Metrode – SSB para duplex e superduplex.

Para isso foram feitos 12 corpos de prova mantendo-se a mesma densidade de corrente e energia de soldagem para todos, de maneira que se variou somente a frequência de onda em três valores 20Hz, 70Hz e 100Hz. O utilizando o menor e o maior valor permitido pelo equipamento, para que se conseguisse avaliar a faixa mais ampla possível.

Nesses corpos de prova foram feitos testes de composição química, incluindo Nitrogênio e Oxigênio, e contagem de ferrita. De maneira a se avaliar os efeitos positivos ou negativos da variação da frequência na estrutura do material e na sua composição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Para um aço ser considerado um inoxidável tem tipicamente uma adição de 12% de Cr em sua composição, com esse nível já se pode garantir à formação de uma camada de óxido de cromo em toda a superfície do material e garantir sua resistência à corrosão. Basicamente os inoxidáveis são classificados pela sua estrutura metalúrgica, sendo, portanto divididos em ferríticos, austeníticos, martensíticos e Duplex (ferrita e austenita).

Dentro dessas estruturas tem-se como base ligas Ferro-Cromo, Ferro-Cromo-Carbono, Ferro-Cromo-Níquel e Ferro-Cromo-Níquel-Molibdênio, entretanto outros elementos como Nitrogênio, Titânio, Manganês, Silício, Nióbio são incluídos nessas estruturas para aprimorar suas propriedades e dar-lhe as características desejadas para sua futura aplicação.

O aço austenítico consiste nas séries 200 e 300, tendo uma adição de Ni em sua composição química aumentando a formação da austenita (CFC) e melhorando a estabilidade do material a baixas temperaturas. Normalmente os austeníticos contém cerca de 15% de Cr e Ni suficiente para manter a estrutura austenítica meta a temperatura de 1100°C até o ambiente, evitando a formação de martensita. Nesta classificação o mais usual da série é o AISI 300, a qual contem tipicamente 8 a 20% Ni e 16 a 25%Cr. Pequenas adições de ligas são feitas para uma melhor propriedade do material, como por exemplo,

1%Si (máximo) como agente desoxidante, 0,02 a 0,08%C e aproximadamente 1,5%Mn, ambos utilizados para estabilizar a austenita.

Em geral os aços inoxidáveis austeníticos têm como característica resistência à corrosão moderadas e fortes, além de terem estruturas não magnéticas.

Os aços inoxidáveis ferríticos estão na série 400 das ligas Fe-Cr, tendo como estrutura cristalina predominante a CCC. São ferromagnéticos e apresentam boa ductilidade, entretanto ao se comparar aos aços inoxidáveis austeníticos tem uma resistência inferior a altas temperaturas e uma tenacidade limitada a baixas temperaturas. Além do Cr podem-se encontrar outros elementos como Si, Al, Mo, Nb. Inclusive S para melhorar sua usinabilidade. [5]

Os aços inoxidáveis martensíticos também estão dentro da série 400, porém com uma composição química diferenciada. Tendo um teor de C mais alto e menos Cr de maneira a permitir um endurecimento com tratamento térmico. Os martensíticos solidificam com ferrita gama e durante a solidificação transformam-se em austenita. Quando o resfriamento é suficientemente rápido como no caso da soldagem, esta austenita passa para martensita. Lembrando que o diagrama Fe-Cr é apenas uma base de consulta, consideram que a presença de C por exemplo pode deslocar os limites de austenita e ferrita.

2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser caracterizados por algumas propriedades dentre elas uma tenacidade e ductilidade superiores à maioria dos aços, sendo essa característica mantida mesmo a baixas temperaturas o que o torna indicado para aplicações em temperaturas criogênicas, por exemplo.

Apresentam boa resistência mecânica e à corrosão em temperaturas elevadas, tornando-o mais indicado para situações de trabalho com temperaturas elevadas do que os aços inoxidáveis ferríticos ou martensíticos, e até mesmo aços baixa liga.[12].

Em geral aços inoxidáveis austeníticos são considerados dentro os demais inoxidáveis o mais fácil de ser soldado, isso se dá devido as suas propriedades físicas. Como por exemplo, sua condutividade térmica que usualmente é a metade da dos inoxidáveis ferríticos, ou seja, para se ter uma mesma penetração é necessária uma menor energia de soldagem. Por outro lado o coeficiente de expansão térmica dos austeníticos é 30 a 40% maior que dos ferríticos, o que leva a uma maior deformação do material durante a soldagem e maior estresse residual.

Outro ponto importante dos austeníticos é que apresentam um metal fundido na poça de fusão mais viscoso que os demais, o que ocasiona uma menor fluidez do metal e consequentemente um menor molhamento, o que pode acarreta defeitos por falta de fusão ou de penetração dependendo da configuração da junta.

A tabela 2.1 mostra alguns dos aços inoxidáveis austeníticos e suas principais características

Tabela 2.1 – Composição Química (% em peso) e característica de alguns aços inoxidáveis austeníticos [12]

Tipo AISI	C	Cr	Ni	Outros elementos	Propriedades Gerais e aplicações Típicas
304	0,08	18,0 20,0	8,0 11,0	Mn:2,0 máx.. Si: 1,0 máx.	Tipo 18:8 de C mais baixo, soldável com menor perigo de corrosão Inter cristalina, mesmas aplicações dos tipos 301 e 302
308	0,08	19,0 21,0	10,0 12,0	Mn: 2,0 máx. Si: 1,0 máx.	Maior resistência à corrosão que o 18:8; para consumíveis de soldagem, entre outras aplicações.
309	0,20	22,0 24,0	12,0 15,0	Mn: 2,0 máx. Si: 1,0 máx.	Boa resistência à oxidação e mecânica a altas temperaturas: para equipamentos da indústria química, peças de forno estufas.
310	0,25	24,0 26,0	19,0 22,0	Mn: 2,0 máx. Si: 1,5 máx.	Boa estabilidade nas temperaturas de soldagem, consumíveis de soldagem, equipamentos para indústria química, peças de fornos estufas; resiste à oxidação até temperaturas da ordem de 1100°C.
316	0,08	16,0 18,0	10,0 14,0	Mo: 2,0 a 3,0 Mn: 2,0 máx. Si: 1,0 máx.	Menor resistência à corrosão química; para equipamentos da indústria de papel, etc.
317	0,08	18,0 20,0	11,0 14,0	Mn: 3,0 a 4,0 Mn: 2,0 máx. Si: 1,0 máx.	Melhor resistência à corrosão que o tipo 316, idênticas aplicações.
321	0,08	17,0 19,0	9,0 12,0	Ti=5% C min. Mn: 2,0 máx. Si: 1,0 máx.	Tipo 18:8, estabilizado contra corrosão inter cristalina a altas temperaturas; para aplicações que exigem soldagem
347	0,08	17,0 19,0	9,0 12,0	Nb=10% Cmin. Mn: 2,0 máx. Si: 1,0 máx.	Tipo 18:8, estabilizado para serviço a alta temperatura e onde se exige soldagem.

Dentro os diversos tipos de aços inoxidáveis austeníticos disponíveis no mercado, os mais comuns contem entorno de 18%Cr e 10%Ni. Tornando possível uma avaliação deste aço a partir do diagrama ternário Fe-18%Cr-Ni, conforme figura 2.1. Neste aço com concentrações de Ni inferiores a 1 ou 1,5% apresentam uma estrutura totalmente ferrítica independente da temperatura estudada (ambiente ou fusão). Conforme se aumenta a concentração de Ni a liga vai se tornando bifásica (austenita mais δ -ferrita) em determinadas temperaturas, até chegar ao ponto onde se terá somente a formação austenítica a temperatura ambiente. Isso ocorre para concentrações acima de 8%Ni, que é exatamente o ponto onde se encontram os aços inoxidáveis austeníticos.

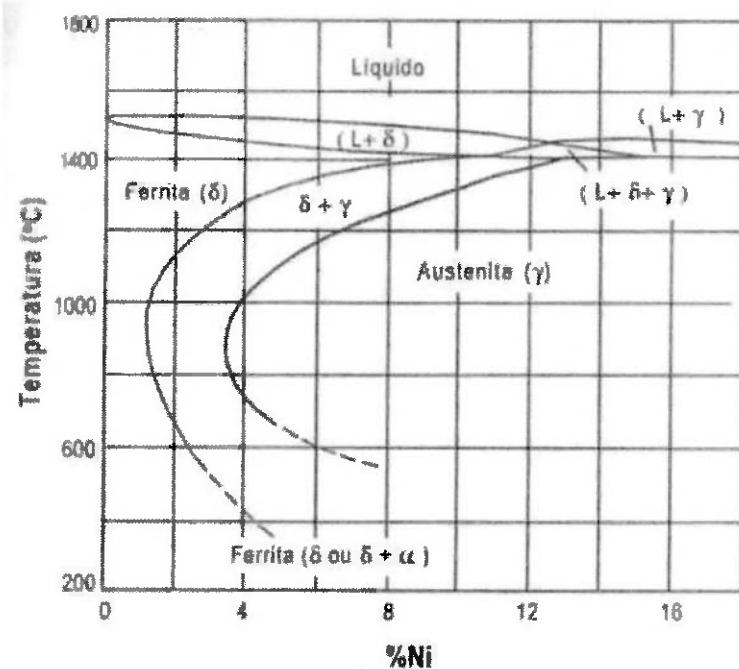


Figura 2.1 – Seção vertical do diagrama ternário Fe-Cr-Ni com 18% de Cr, válido para teor de C inferior a 0,03%. [12]

Entretanto com um aumento do elemento Cr, amplia-se a faixa de temperatura para a existência da δ-ferrita, o que obriga a um aumento do teor de Ni para se continuar obtendo uma estrutura austenítica a temperatura ambiente. Por outro lado com o aumento do Cr se tem uma redução da velocidade de transformação da austenita.

O elemento químico Carbono em aços inoxidáveis austeníticos a uma temperatura superior a 900°C apresenta um efeito semelhante ao do Ni, ou seja, tende a ampliar a faixa de existência da austenita e reduz a existência de δ-ferrita. Entretanto a solubilidade do C diminui conforme se diminui a temperatura e para ligas com menos de 0,03%C este feito é praticamente imperceptível, pois o C acaba por ficar em solução sólida na austenita.

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ter a adição de outros elementos químicos conforme a propriedade que se quer alcança a tabela 2.2 abaixo resume os efeitos desses elementos:

Tabela 2.2 – Efeitos dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos

[12]

Elemento	Tipos de Aço	Efeitos
C	Todos	Promove fortemente a formação de austenita. Pode formar carboneto com o cromo e resultar em corrosão intergranular
Cr	Todos	Promove formação de ferrita. Aumenta resistência à oxidação.
Ni	Todos	Promove formação de austenita. Aumenta resistência a alta temperatura, resistência à corrosão e ductilidade.
N	XXX N	Promove fortemente a formação de austenita. Aumenta a resistência mecânica.
Nb	347	Reduz sensibilidade à corrosão intergranular combinado com o C. age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita. Aumenta resistência à fluência.
Mn	2 XX	Estabiliza a austenita à temperatura ambiente mas forma ferrita a altas temperaturas. Inibe a fragilidade a quente (hot shortness) pela formação de MnS
Mo	316; 317	Aumenta a resistência a alta temperatura. Aumenta resistência à corrosão em meios redutores. Promove a formação de ferrita.
P, Se, S	303; 303 Se	Melhoram a usinabilidade, mas promovem fissuração de solidificação. Diminuem ligeiramente a resistência à corrosão.
Si	302 B	Aumenta a resistência à formação de corrosão por oxidação a alta temperatura e promove a formação de ferrita. Sempre adicionado em pequenas quantidades para desoxidação.
Ti	321	Reduz a sensibilidade à corrosão Inter granular combinando com o C. age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita.
Cu		Aumenta a resistência à corrosão em certos meios. Diminui a sensibilidade à corrosão sob tensão. Causa efeitos endurecedores por envelhecimento.

2.2.1 ESTRUTURA DO METAL DE SOLDA

Como descrito anteriormente os aços inoxidáveis austeníticos são uma fase-simples, de corpo de face centrada (CFC), sendo que essa estrutura é mantida mesmo elevando a altas temperaturas ou criogênicas, a partir de adição de elementos de liga no material.

Apesar de sua estrutura basicamente austenítica se pode encontrar no metal de solda pequenas quantidades de ferrita de estrutura cúbico de corpo centrado (CCC), sendo esta caracterizada como ferrita "delta" a elevadas temperaturas

Os possíveis pontos de concentrações de ferrita "delta" (CCC) é uma característica essencial, mas em uma concentração excessiva (acima de 10%) tende a reduzir a ductilidade, impacto e resistência à corrosão do material. Enquanto que uma concentração muito baixa (menor que 3%) pode resultar em trincas de solidificação. [7]

Durante a solidificação dos aços inoxidáveis austeníticos a fase primária de solidificação pode ser austenítica ou ferrítica, isso depende da composição química do aço. Têm-se estudos que demonstram que ao se solidificar a austenita primária ocorre grandes chances de apresentar trincas de solidificação, o que não ocorre quando se solidifica a partir de ferrita primária. Sendo assim para ter uma melhor avaliação do processo de solidificação, pode-se utilizar como base o diagrama ternário de Ferro-Níquel-Cromo sugerido por Speich, figura 2.2.

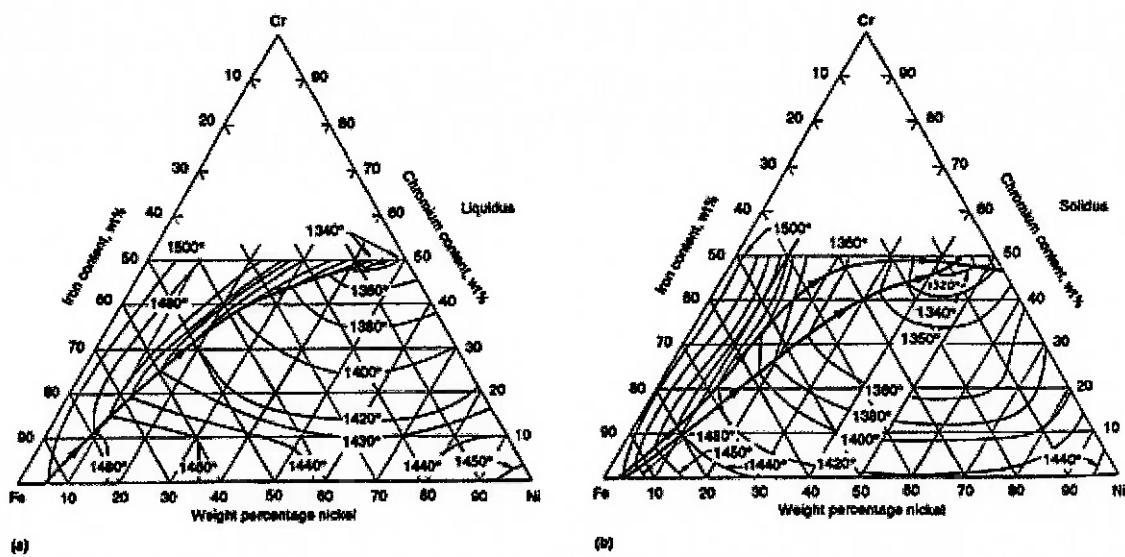


Figura 2.2 – Projeções das superfícies “liquidus” (a) e “solidus” (b), como contornos isotérmicos no diagrama ternário do Fe-Ni-Cr. Temperatura expressa em °F. [10]

Na figura 2.2a a linha em negrito representa a passagem para a fase líquida. Ligas com a composição ricas em Cr tem ferrita delta na fase de solidificação primária, ou seja, é a primeira fase a se solidificar a partir do líquido. Por outro lado ligas ricas em Ni apresentam a austenita como fase de solidificação primária, sendo está a primeira a se solidificar. A linha em negrita na figura 2.2b segue a mesma tendência que a do gráfico da fase líquida. [7 e 10].

A figura 2.3 apresenta a seção vertical do diagrama ternário mostrado acima para aproximadamente 70% de Fe. Este também é chamado de “diagrama de fase pseudo-binário”, e demonstra o desenvolvimento da microestrutura especificamente nos aços inoxidáveis austeníticos, onde a ferrita pode ter três diferentes tipos de formação morfológica: interdendríticas, vermicular e acicular.

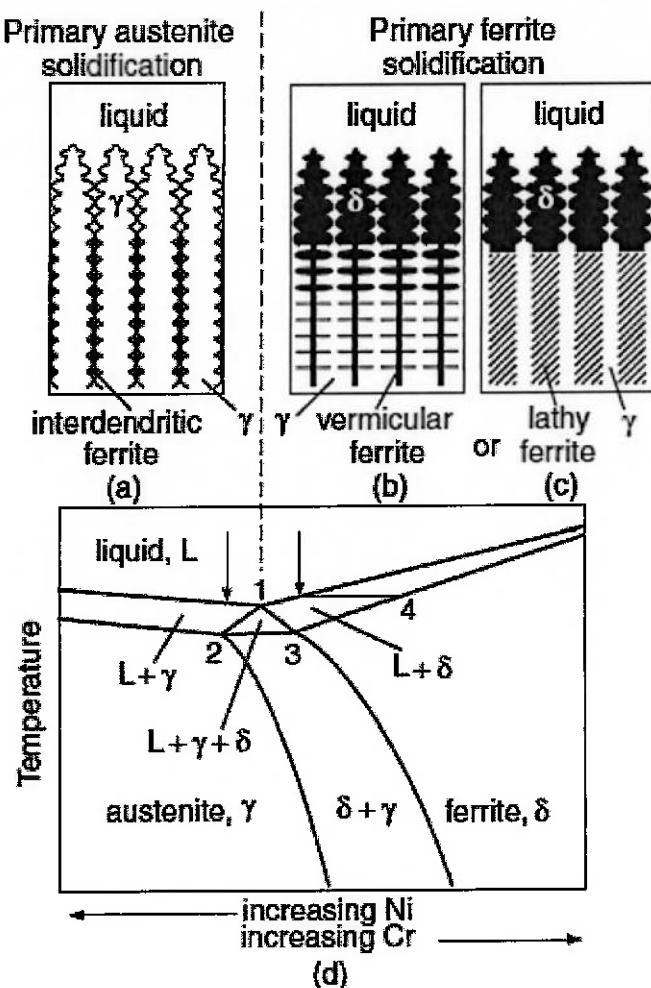


Figura 2.3 O esquema mostra a solidificação e as transformações pós-solidificação nas soldagens Fe-Cr-Ni: (a) ferrita interdendrítica; (b) ferrita vermicular (c) ferrita acicular (d) seção vertical do diagrama de fase ternário de aproximadamente 70%Fe. [7]

O ponto 1 do gráfico 2.3 (d) é um triângulo eutético de três fases ($L+\gamma+\delta$) corresponde à intersecção entre a seção vertical e a curva em negrito da figura 2.2a. Os outros pontos, 2 e 3, do triângulo por outro lado correspondem à intersecção entre a seção vertical e as duas curvas em negrito da figura 2.2b.

Austenita Primária: Para ligas ricas em Ni (lado esquerdo do gráfico da figura 2.3) a austenita é a fase primária de solidificação, como demonstrado no "diagrama de fase pseudo-binário". Na figura as dendritas primárias de cor branca são de austenita formada durante a solidificação e, entre estas, representada pela cor preta está a ferrita "delta", que se forma quando se passa pelo triângulo de ternário, durante a solidificação, sendo esta é denominada de ferrita interdendrítica.

Ferrita Primária: Para ligas ricas em Cr (lado direito do gráfico da figura 2.3) a ferrita "delta" é a fase primária de solidificação, como demonstrado no "diagrama de fase pseudo-binário". No qual as dendritas de cor preta são as ferritas "delta", ricas em Cr no início da solidificação (ponto 4 do gráfico da figura 2.3) e com o decréscimo da temperatura vai diminuindo a concentração de Cr. Na região de resfriamento entre as fases ($\gamma+\delta$) as dendritas contêm menos Cr transformado em austenita, deixando disponível uma região rica em Cr para a formação em ferrita acicular e vermicular.

Essas fases ferríticas exercem influência na soldabilidade do material e em suas propriedades, tornando necessária uma quantificação de suas concentrações para caracterizar determinado material. Hoje se pode haver essa quantificação através de diagramas ou instrumentos de laboratório.

Para isso foi criado o termo número de ferrita (*Ferrite Number*), conhecido como FN, que representa a medição de ferrita através de técnicas magnéticas padronizadas. Lembrando que para se quantificar a ferrita é necessário fazer corpos de prova seguindo um mesmo padrão de soldagem e resfriamento para se evitar desvios de análises. Demais componentes químicos exercem influência

sobre o FN, como por exemplo, se houver um acréscimo de Nitrogênio na solda a tendência é uma redução no nível de ferrita, conforme demonstrado na figura 2.4.

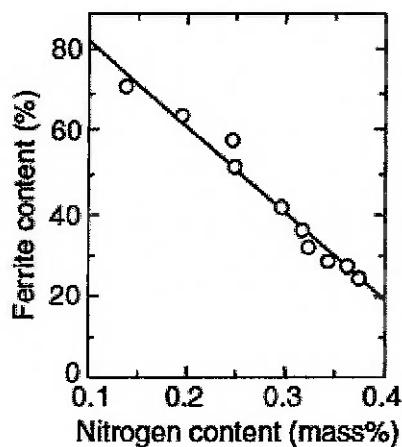


Figura 2.4 Efeito do Nitrogênio no teor de ferrita na soldagem GTAW em aço inoxidável duplex. [7]

Outro ponto importante que se tem nos aços inoxidáveis austeníticos é a formação da fase Sigma, citada anteriormente. Que tem como características ser uma fase dura e frágil, formando-se entre as temperaturas de 600 a 800°C (1110 a 1470°F). Como consequência da partição dos elementos de liga durante a solidificação e nas transformações no estado sólido de ferrita em austenita, esta primeira é enriquecida por elementos de liga que promovem a formação da fase sigma, e ao mesmo tempo é empobrecida por elementos que retardam a formação desta mesma fase. [10]

Em soldagem de inoxidáveis austeníticos a formação da fase sigma se dá na interface entre as estrutura ferrítica e austenítica no metal de solda. Com isso

pode-se afetar a ductilidade e tenacidade do material, prejudicando o seu desempenho principalmente em baixas temperaturas.

2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX

O aço inoxidável duplex apresenta uma estrutura composta por uma mistura de austenita e ferrita. Tem se registro que o primeiro aço duplex fabricado foi na Suécia em 1930, para aplicação em indústria de papel. Durante a Segunda Guerra Mundial criou-se o AISI 329, que teve sua aplicação bem difundida na fabricação de tubos para fabricas que utilizavam ácido nítrico. E assim sucessivamente foram sendo criadas variações dos aços inoxidáveis duplex para as mais variadas aplicações, como vasos de pressão, bombas e trocadores de calor.

Neste trabalho será utilizado o duplex 2209, a qual já faz parte de uma segunda geração de duplex que apresentam o Nitrogênio como um forte elemento de liga, proporcionando boa resistência a corrosão por cloretos e alta resistência.[13]

Como as demais classes de inoxidáveis o grupo dos aços inoxidáveis duplex apresentam variações e dentre elas está o aço superduplex, que consiste um duplex com Cr geralmente entre 25-26% e um leve acréscimo de Mo e N. De maneira geral a sua principal característica que é uma resistência a corrosão por pite (PREN) de 40 a 45. Esse número é obtido pela formula 1:

$$\text{PRE}_N = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5\%W) + 16\%N \quad (1)$$

2.3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Em geral é aceito que com um balanço de 30 a 70% de ferrita e austenita já se tem um aço inoxidável com as propriedades de um duplex. Entretanto para esse tipo de aço é mais comum considerar que haja uma fração volumétrica de 50% de cada estrutura em sua formação.

Como nos demais aços inoxidáveis cada elemento químico tem um função diferente para os aços inoxidáveis duplex. Destes destaca-se os elementos Cromo, Molibdênio, Nitrogênio e Níquel.

O Cromo é necessário no mínimo uma concentração de 10,5% para se formar uma película passiva para proteger contra a corrosão atmosférica, e essa resistência aumenta conforme se aumenta a concentração deste elemento.

Como nos demais inoxidáveis o Cr é um agente formador de ferrita, sendo que neste caso se necessita de uma formação conjunta de ferrita e austenita, quanto mais Cr se tem mais Ni é necessário adicionar ao material para garantir a formação da porcentagem correta de austenita, uma vez que o Ni é um agente austenitzante. Sendo que elevados níveis de Cr acarretam a formação de fases intermetálicas, usualmente se tem menos que 16% nos aços inoxidáveis austeníticos e menos que 20% dos duplex.

Sendo que com a adição do elemento Molibdênio aumenta à resistência a corrosão por pite, em aços inoxidáveis com menos de 18% de Cr a adição de Mo pode ter um efeito três vezes mais efetivo do que uma adição de Cr contra a corrosão. O Mo também é um agente formador de ferrita e aumenta a

tendência da formação de fases intermetálicas. Portanto é recomendada uma concentração em torno de 4% para aços inoxidáveis duplex. [13]

Como outro elemento que aumenta a resistência a corrosão por pite e fresta se tem o Nitrogênio. Além de causar um aumento da resistência do material e retardar a formação de fases intermetálicas, o que facilita inclusive a fabricação deste aço. Sendo por tanto muito utilizado em ligas que apresentam uma alta concentração de Cr e Mo (para se obter uma maior resistência a corrosão), pois inibe a tendência a formação de fase sigma desses elementos. O N é um forte elemento formador de austenita e em algumas situações pode a substituir o Ni, sendo necessário por tanto um ajuste na adição de Ni conforme a concentração de N no material.

E por últimos tem-se o Níquel que é um elemento austenitzante, a qual promove a mudança da estrutura CCC (ferrita) para a estrutura CFC (austenita), conforme figura 2.5. Também tem uma característica de evitar a formação de fases intermetálicas, entretanto seu efeito é inferior quando comparamos com o do N. Um ponto a se destacar é a melhora que promove nos resultados de impacto dos aços inoxidáveis.

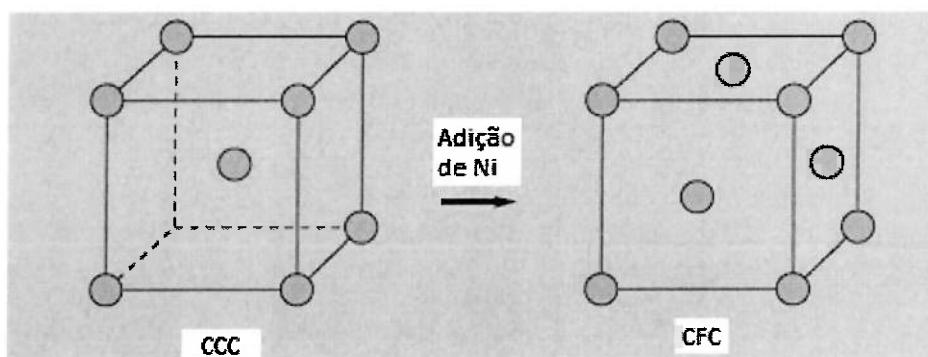


Figura 2.5 Efeito da adição de Ni. [13]

Em geral pode-se observar que temos como principais elementos químicos presentes no duplex, dois formadores de austenita (Ni e N) e dois formadores de ferrita (Cr e Mo), sendo assim é necessário um balanço correto entre esses quatro elementos para que garantir a formação nas proporções desejadas para cada estrutura.

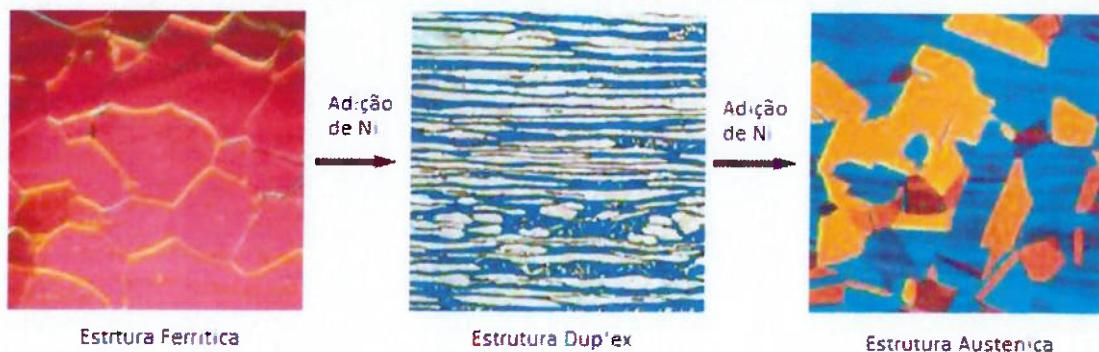


Figura 2.6 A partir da adição de Ni na liga altera-se a estrutura do material. [13]

2.3.2 METALURGIA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

O diagrama ternário Fe-Cr-Ni mostrado na figura 2.2 é o caminho para se compreender a transformação do aço. Ao se avaliar a seção do digrama com 68% de Fe (figura 2.7), observa-se que primeiramente ocorre uma solidificação em ferrita, e parte desta é transformada em austenita quando a temperatura cai para menos que 1000°C (1832°F) dependendo da composição da liga. Termodinamicamente uma vez que a austenita se forma a partir da ferrita não há como passar do equilíbrio de fases. [13]

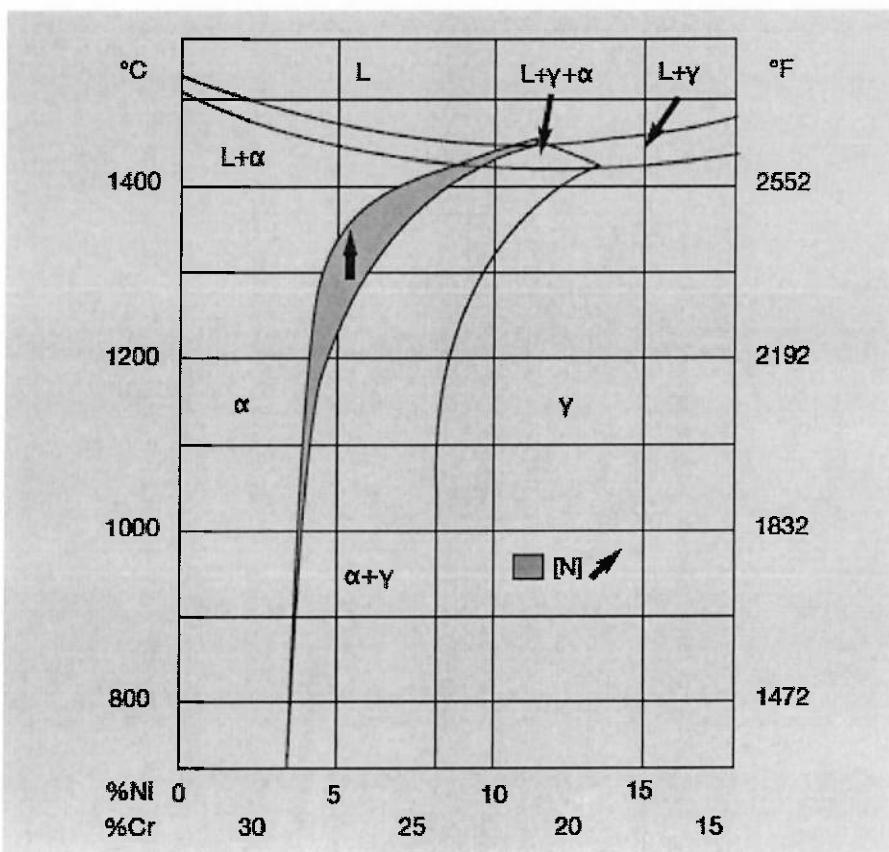


Figura 2.7 Seção do diagrama ternário Fe-Cr-Ni com teor de 68% Fe. [13]

Conforme falado anteriormente a concentração de ferrita e austenita no aço dependerá da composição química, mas também do histórico de temperaturas que o material passou. Pequenas mudanças na composição podem gerar grandes modificações nas fases conforme demonstra o diagrama. Este balanço de fases pode ser previsto através de equações matemáticas, a partir das concentrações químicas, conforme mostram as equações a seguir:

$$\text{Cr}_{\text{eq}} = \% \text{Cr} + 1,73\% \text{Si} + 0,88\% \text{Mo} \quad (2)$$

$$\text{Ni}_{\text{eq}} = \% \text{Ni} + 24,55\% \text{C} + 21,75\% \text{N} + 0,4\% \text{Cu} \quad (3)$$

$$\% \text{ Ferrita} = -20,93 + 4,01\text{Cr}_{\text{eq}} + -5,6\text{Ni}_{\text{eq}} + 0,016T \quad (4)$$

Onde T é a temperatura em Celsius por volta de 1050°C e 1150°C e todos os elementos químicos são % em peso. Entretanto esses cálculos não nos podem

dar um número preciso, pois taxa de resfriamento ou energia de soldagem utilizada na soldagem interferem diretamente na proporção de ferrita que será transformada em austenita.

Na figura 2.7 também demonstra o efeito da adição do N (parte em cinza) como um agente formador de austenita, pois sua presença eleva a temperatura de transformação da ferrita para austenita durante o resfriamento. Isso também pode em alguns casos reduzir a excessiva formação de ferrita na ZAC.

2.4 DIAGRAMAS CONSTITUCIONAIS

A ferrita δ residual no aço inoxidável a temperatura ambiente que se formou depois desse aço ter passado por um processo de soldagem, ou seja, fusão seguida de solidificação determinara algumas das propriedades do material.

Como falado anteriormente a solidificação de ferrita primária evita trincas a quente nos aços inoxidáveis austeníticos, entretanto para uma determinação mais precisa do modo de solidificação seria necessário um teste de metalografia.

Sendo assim de maneira geral a concentração de ferrita δ deve ser quantificada de maneira a se determinar o possível comportamento do material nas condições que será submetido. Como nem sempre é possível quantificar a concentração de ferrita δ de maneira experimental foram criados com o decorrer dos anos diagramas que a partir da composição química do material seria possível determinar através de cálculos a concentração de δ-ferrita.[11]

Entretanto esses diagramas não tem a determinação do FN como única funcionalidade, tendo em mãos a composição química do material podemos

calcular os Cr e Ni equivalente dos materiais e com esses dados plotar nos diagramas disponíveis e determinar qual a estrutura predominante do material.

Em 1920 Strauss e Maurer lançaram iniciaram seus trabalhos para determinação de um diagrama de Ni e Cr equivalente, até em que em 1939 chegaram a sua versão final.

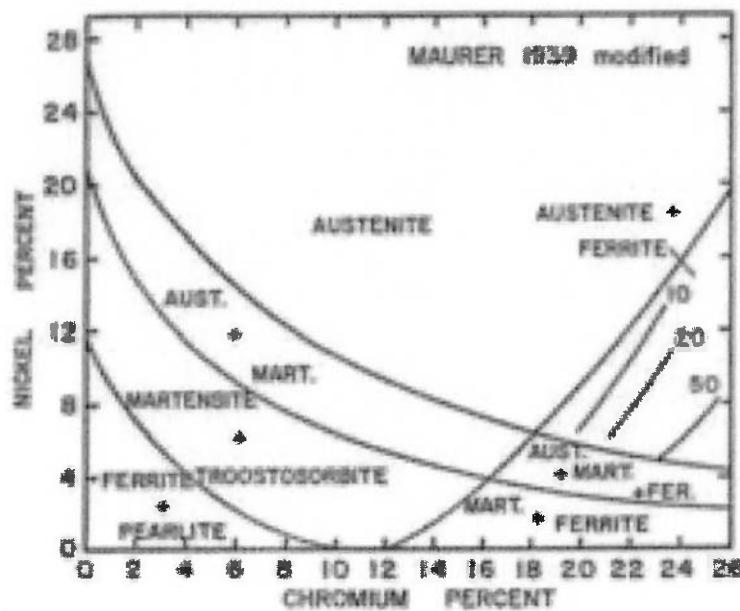


Figura 2.8 Diagrama de Maurer, versão de 1939. [11]

Este foi apenas um passo inicial para as futuras modificações que estavam por vir, como, por exemplo, durante a Segunda Guerra Mundial onde se teve um grande incentivo para aprimorar os diagramas uma vez que existia situações com soldas dissimilares em aço inoxidável. Até que em 1947 Schaeffler lançou seu primeiro diagrama, que passou por revisões do próprio autor até que em 1949 chegou no que conhecemos hoje como Diagrama de Schaeffler

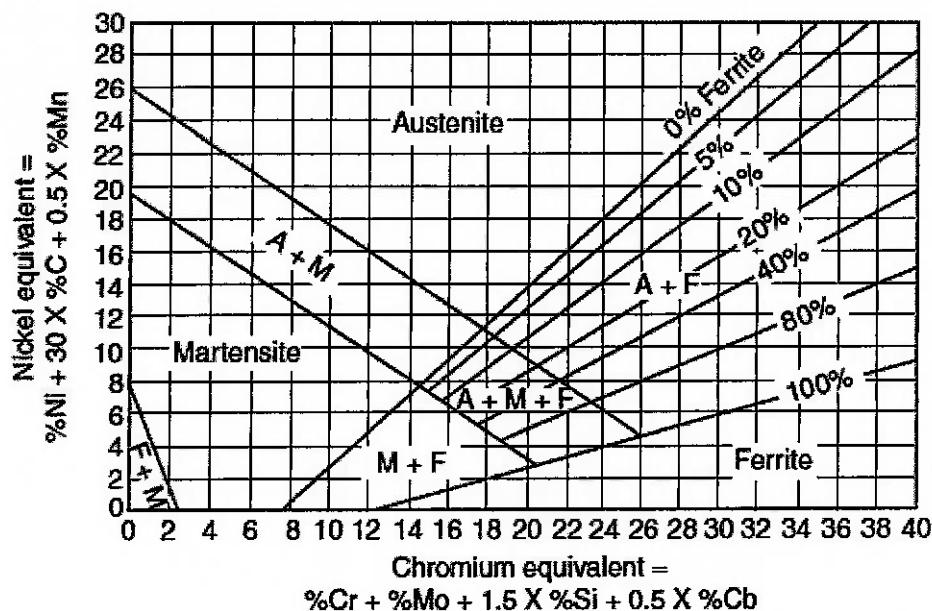


Figura 2.9 Diagrama de Schaeffler, versão 1949. [11]

O diagrama de Schaeffler primeiramente propõe uma relação quantitativa entre a composição química e a concentração de ferrita no metal soldado. Como demonstrado na Figura 2.9, o Cr equivalente é determinado através da concentração dos elementos químicos formadores de ferrita: Cr, Mo, Si e Cd, enquanto que o Ni equivalente é determinado pela concentração de elementos formadores de austenita: Ni, C e Mn. [11]

Em 1956 DeLong lançou seu primeiro diagrama, baseando-se na última versão do diagrama de Schaeffler, entretanto acrescentou neste o elemento Nitrogênio como um elemento redutor de formação de δ-ferrita. A partir de avaliações feitas por ele em diversas soldagens de GMAW, GTAW e SMAW, constatou que o Nitrogênio tinha um efeito austenitzante de coeficiente igual a 30. Sendo assim acrescentou-o na formula do Ni equivalente já proposta por Schaffler. Até

que em 1973 lançou uma revisão de seu próprio diagrama, a qual a utilizamos até hoje e destinado principalmente para a série 300 dos inoxidáveis.

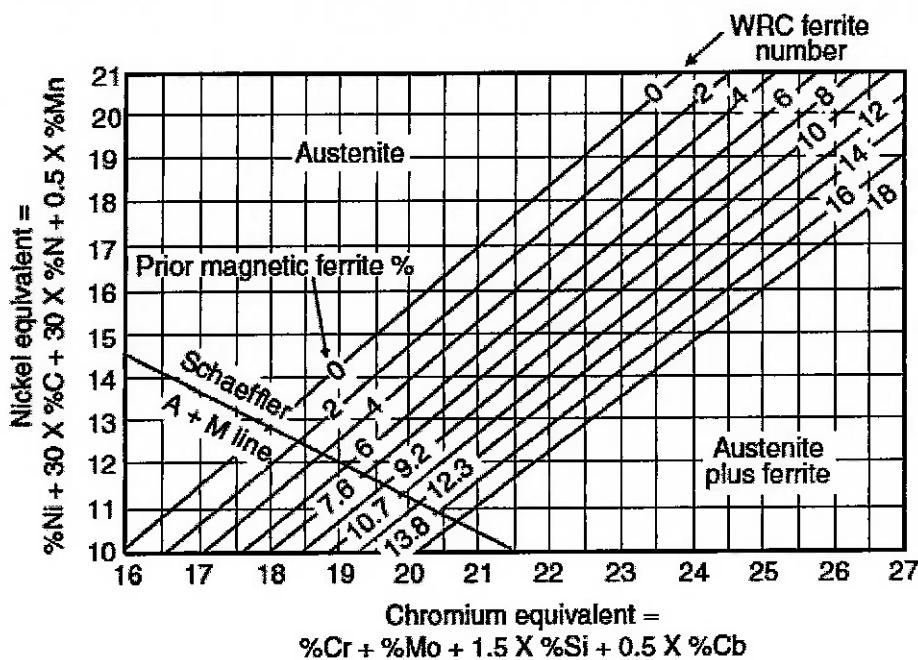


Figura 2.10 Diagrama de DeLong, versão de 1973. [11]

Uma das alterações desta versão foi uma relocação das linhas de ferrita para melhorar a precisão do diagrama para materiais que estavam surgindo como AISI 316 e AISI 317. Mas como a principal modificação fica o acréscimo do Ferrite Number (FN) nas linhas de determinação de Ferrita. A qual era uma escala padrão determinada pelo Welding Research Council (WRC).

Entretanto quando se utilizava esses diagramas havia divergência com os resultados obtidos experimentalmente, isso ocorria devido a dificuldades de se padronizar um único método de se realizar o teste como, por exemplo, a dificuldade de se obter os reagentes necessários. Sendo assim em 1972 a WRc junto da IIW (International Institute of Welding) padronizaram um único método para se mensurar experimentalmente a ferrita de o FN, de maneira a se

diminuir as divergências. Incluindo que em 1974 a AWS (American Welding Society) lançou a AWS A4.2 com descrevendo o procedimento.

Por volta dos anos 80 novas ligas estavam sendo desenvolvidas e com isso surgia a linha dos aços inoxidáveis duplex, a qual apresentavam em sua estrutura um FN superior a 28, máximo até então estipulado pelos procedimentos da WRC, uma vez que não havia padrões para números superiores até então. Desta maneira em 1985-1986 a WRC e a AWS alteraram suas procedimentos para encaixar o então novo aço inoxidável duplex.

Esse novo aço também forçou uma necessidade de se revisar os diagramas até então utilizados, pois não se contemplava o intervalo necessário de FN para os aços inoxidáveis duplex. O que é facilmente explicável uma vez que, por exemplo, o diagrama de DeLong se baseava na série 300 – aços inoxidáveis austeníticos. Sendo assim em 1988 Siewert, McCowan e Olson lançaram o que ficou conhecido como diagrama WCR-1988, no qual contemplava um FN até o valor 100 e representava outros modos de solidificação (A, AF, FA, F). Incluindo desta maneira os aços inoxidáveis duplex e outros inoxidáveis com altas ligas.[11]

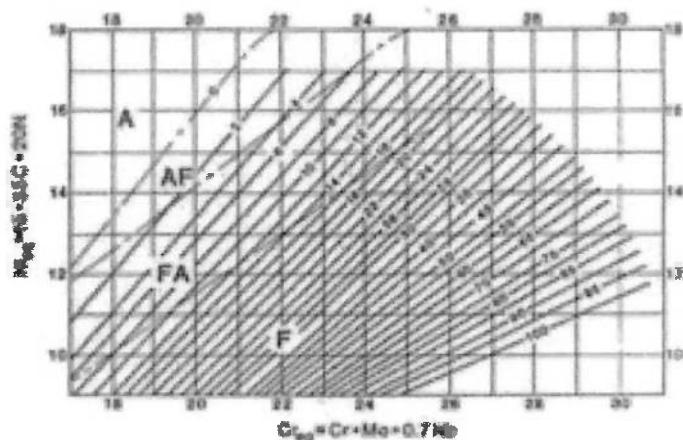


Figura 2.11 Diagrama WRC-1988. [11]

Mais uma vez devido o desenvolvimento de novas ligas tornou-se necessário uma atualização do diagrama. Kotecki e Siewert em 1992 lançaram uma revisão do WRC-1988, onde acrescentaram no Ni equivalente o elemento Cu, com o objetivo de se ter um FN mais preciso para aços inoxidáveis duplex que contem em sua composição cerca de 2% Cu.

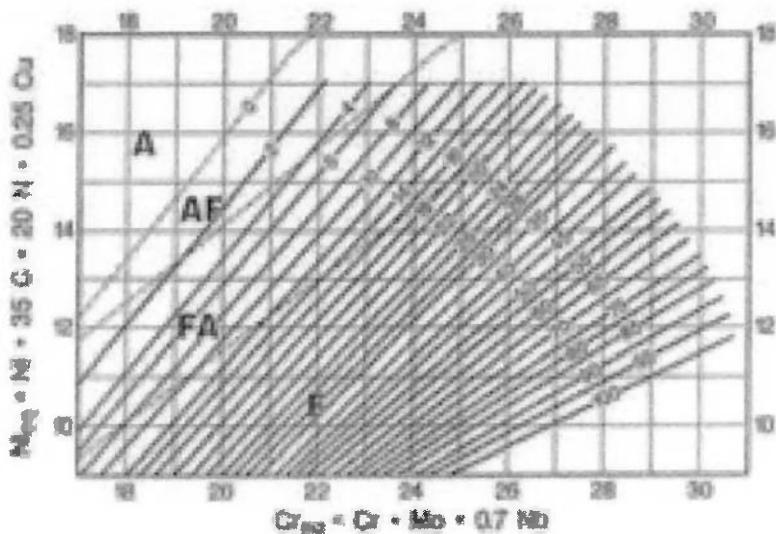


Figura 2.12 Diagrama WRC-1992. [11]

Ficando conhecido como o diagrama WRC-1992, este substitui o diagrama de Delong no código ASME III para aços inoxidáveis austeníticos e duplex em 1994.

Essas são apenas alguns exemplos dos diagramas que foram criados no decorrer da história para se determinar o FN ou a estrutura formada no aço, de maneira se determinar qual o melhor consumível para a soldagem ou para se auxiliar a solução de defeitos na soldagem ou compreensão de resultados mecânicos. Hoje de maneira geral são utilizados 3 diagramas conforme a necessidade: Schaeffler, DeLong e WRC-1992

2.5 SOLDAGEM

A soldagem é a forma eficaz de unir dois materiais de maneira que garanta uma continuidade de suas características físicas, químicas, mecânicas e metalúrgicas. Existem várias maneiras que podem ser utilizadas para definir a soldagem, dentro das quais se destaca a adotada pela *American Welding Society* – AWS: “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”. Existe ainda uma definição mais voltada para o campo da química: “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar as atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”.

Existem dois pontos relevantes nessas definições de soldagem. Primeiro que a soldagem não é um processo voltado unicamente para união de metais, como citado na definição da AWS “metais e não metais”. E segundo que apesar de classicamente a soldagem ser voltada para a união de materiais têm-se processos de recuperação de peças ou de revestimento de superfícies que também são considerados processos de soldagem.

O processo de soldagem em nível atômico baseia-se na simplesmente interação das forças interatômicas dos materiais a serem unidos, obtidas através de uma aproximação suficiente de seus átomos para que ocorra formação de ligações metálicas e/ou de Van der Waals, e desta forma esses átomos se arranjam de

uma maneira ordenada formando as estruturas cristalinas características do material.

Para que se tenha esse “contato” a nível atômico e consequentemente a união entre os átomos, precisa-se primeiro ultrapassar duas barreiras, que seriam uma camada de óxidos e um filme de gás e umidade que ficam na superfície dos metais. Desta forma para se conseguir uma perfeita união dos materiais é necessário preencher alguns requisitos básicos que seriam: o fornecimento de energia suficiente para fusão; remover a camada de óxidos, umidade e contaminantes das superfícies a serem unidas; evitar a contaminação do corpo a ser soldado por gases e umidade provenientes da atmosfera e ter um processo que permita um controle dos mecanismos e fenômenos que ocorrem durante a soldagem [1 e 8].

Um dos métodos utilizados para esse processo é a soldagem por fusão que consiste em fornecer calor até fusão do metal de base e do metal de adição (quando este é utilizado). No local onde ocorre o deslocamento da energia necessária para a soldagem e consequentemente a fusão dos materiais denomina-se “poça de fusão”, sendo que o calor gerado nesta região acaba por afetar também a estrutura cristalina do metal de base, gerando uma área chamada de zona afetada pelo calor. Dentre os diversos tipos de soldagem por fusão neste trabalho será abordado especificamente o processo de soldagem a arco elétrico por arco submerso.

2.5.1 LIGAÇÕES QUÍMICAS

Os materiais metálicos possuem no máximo 3 elétrons na camada de valência, sendo que estes estão parcialmente “livres” para se movimentarem ao longo de todo material, isso se dá pelo motivo de não estarem “ligados” diretamente a qualquer um dos átomos que formam o corpo. É como se existisse uma nuvem com todos os de elétrons de valência dos átomos constituintes do material, pode-se dizer que esses elétrons pertencem ao metal como um todo. Os elétrons restantes, ou seja, os que não estão na camada de valência, ficam junto dos núcleos atômicos formando os “núcleos iônicos”. E os elétrons livres protegem os núcleos iônicos e atuam como uma “cola” que os mantém unidos, devido a forças eletrostáticas mutuamente repulsivas que agem sobre eles.

Esse tipo de ligação aplicasse a todos os elementos dos Grupos IA e IIA da tabela periódica e para todos os metais elementares. Sendo possível explicar algumas características desses materiais devido a suas ligações metálicas, como por exemplo, os metais apresentam boa condutividade de calor e eletricidade, como consequência dos elétrons livres que possibilitam essa “movimentação” de energia. Além de que a maioria dos metais e suas ligas apenas sofrem uma fratura depois da sua exposição a níveis significativos de deformação permanente, que esta relacionada à natureza das ligações metálicas [5]

Outro tipo de ligação presente nos metais são as ligações de Van der Waals, também conhecidas como ligações secundárias, estas acontecem quanto se tem uma formação de dipolos elétricos, ou seja, quando ocorrer uma separação das cargas positivas e negativas de um átomo ou molécula. A partir da energia

de atração de Coulomb tem-se uma ligação entre essas extremidades carrega eletricamente (sendo sempre positivo com negativo). Este tipo de ligação é de um caráter enérgico mais fraco quando comparamos com as ligações primárias (ligações metálicas). Um exemplo dessa ligação é a molécula a água

2.5.2 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico consiste em uma descarga elétrica a altíssimas temperaturas, dando origem ao quarto estado da matéria, denominado plasma, a qual é constituída por um gás ionizado e eletricamente neutro. Este processo produz uma energia térmica suficiente para produzir a fusão localizada das peças a serem unidas, sendo que o jato plasma sempre flui do consumível em direção a peça a ser soldada. Portanto o comportamento do arco elétrico é importante para a soldagem devido: (a) o arco é a fonte de calor para a soldagem, forma a poça de fusão e funde o metal de adição. (b) com a alta temperatura, mais as forças eletromagnéticas, mais o fluxo de plasma, propiciam intensas reações químicas e homogeneidade na poça de fusão. (c) as forças do arco elétrico são responsáveis pela transferência metálica para a peça soldada. [9]

Eletricamente o arco de soldagem pode ser caracterizado pela diferença de potencial entre a extremidade da peça a ser soldada com o consumível de soldagem e pela corrente elétrica que circula entre eles. Essa diferença de potencial entre as extremidades do arco varia com: a distância entre os eletrodos, que é conhecido como comprimento de arco, com a forma, tamanho

e material dos eletrodos, composição e pressão do gás na coluna de plasma, a corrente utilizada na soldagem, entre outros fatores.

O arco elétrico apresenta três regiões distintas, conforme demonstrado na

Figura 1:

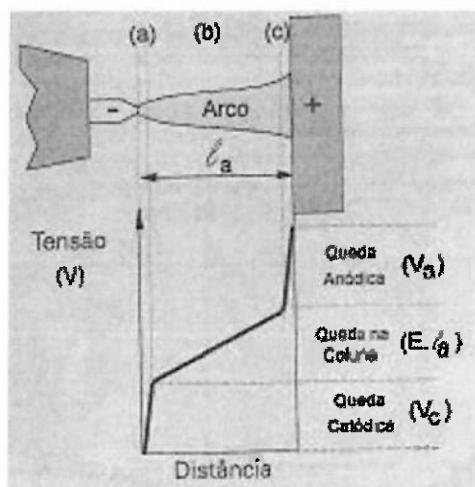


Figura 2.13 Regiões de um arco elétrico de soldagem (esquemáticas): (a) Zona de queda catódica, (b) Coluna do arco, (c) Zona de queda anódica e l_a comprimento do arco. [9]

As regiões de queda anódica e catódica apresentam elevados gradientes térmicos e elétricos, sendo as somas das quedas de potencial nessas regiões aproximadamente constante, independente das condições de operação. Já a parte visível e brilhante do arco é o jato de plasma, a qual apresenta gradientes térmicos e elétricos mais baixos que as duas regiões anteriores.

O plasma é constituído por moléculas, átomos, íons e elétrons, sendo os dois últimos responsáveis pela passagem da corrente elétrica e, consequentemente, a estabilidade do arco está ligada a geração de elétrons e íons em grande quantidade durante a soldagem, sendo estes produzidos através dos choques

entre os constituintes da coluna de plasma a altas temperaturas. Entretanto os elétrons apresentam uma massa pequena ao se comparar com os demais constituintes do arco, tendo portando uma velocidade muito superior que as dos demais e consequentemente tornam-se responsáveis por mais de 90% do transporte da corrente elétrica no arco de soldagem. Desta forma para se garantir que a ionização do plasma e, portanto, a capacidade de conduzir corrente não seja perdida, deve- se sempre manter altas temperaturas no arco elétrico.

O jato plasma influência em mais três importantes pontos do arco elétrico: a penetração da solda no metal de base, pois empurra o gás contra a peça, proporciona certa rigidez ao arco elétrico e interfere na transferência do metal do eletrodo para a poça de fusão quando se utilizada um eletrodo consumível, pois as forças magnéticas do jato de plasma tentem a estrangular o metal líquido contribuindo para separá-lo do eletrodo ainda sólido.

2.5.3 REAÇÕES QUÍMICAS NA SOLDAGEM

Na poça de fusão durante a soldagem não há um equilíbrio predominante, pois apresenta uma temperatura muito alta, altos gradiente de densidade, pouco tempo para reações e altas correntes elétricas. Entretanto apesar dessas considerações podem-se aplicar conceitos de equilíbrio de reações e termodinâmica para se estudar as reações químicas e mecanismos que envolvem a soldagem. Para isso, assume-se que em altas temperaturas a alta interação na superfície do líquido atinge um equilíbrio termodinâmico, por

menor que seja esse tempo. Além de levar em considerações os parâmetros utilizados na soldagem que interferem diretamente na interação entre a escória e o metal de solda.[7]

As reações termo-metalúrgicas são influenciadas pelo processo que ocorre na ponta do eletrodo. Um exemplo disto é quando os parâmetros de soldagem interferem no tamanho da gota de metal líquido, que por sua vez altera a cinética química. Se aplicar a termodinâmica nestes pontos pode-se dizer a direção que irá tomar as reações químicas, porém não determinar exatamente qual será a composição química do metal de solda.

A temperatura efetiva da reação escória-metral é estimada em aproximadamente 1900°C, sendo uma temperatura intermediária entre o ponto mais quente no centro do arco elétrico (2300°C) e o ponto de fusão do ferro 1900°C. Ou seja, durante o tempo de vida de uma gota de metal líquido sendo transferida a temperatura média é de 1900°C, e neste ponto o Oxigênio proveniente das reações no arco é distribuído por toda a gota e este irá reagir com os elementos metálicos e formará os óxidos. Estes produtos da oxidação iram migrar para a escória, até atingir um equilíbrio de reação entre escória-metral. O tempo estimado de contato para essas reações entre a escória fundida e o metal fundido é de um intervalo de 3 a 8 segundos.

2.5.3.1 GAS – METAL

Nitrogênio, Oxigênio e hidrogênio são gases que podem ser absorvidos durante a soldagem pelo metal de solda, estes podem ser provenientes do ar, do

próprio metal de solda (umidade ou sujeira em sua superfície) ou do fluxo utilizado para proteger a poça de fusão. Considerando sempre que a reação gás-metal ocorre entre a fase gasosa com o metal ainda líquido durante a soldagem. Cada um desses elementos tem uma consequência no resultado da soldagem, conforme tabela 2.3 abaixo:

Tabela 2.3 – Efeitos dos elementos dos gases na soldagem [7]

	Nitrogênio	Oxigênio	Hidrogênio
Aços	Aumenta a resistência, mas reduz impacto	Reduz o impacto, mas promove a formação de ferrita acicular	Induz a formação de trincas por Hidrogênio
Inoxidáveis Austeníticos ou Duplex	Reduc a formação de ferrita e favorece o aparecimento de trincas de solidificação		
Alumínio		Forma filme de óxidos, a qual podem aprisionar as inclusões.	Favorece o aparecimento de porosidade e reduz a resistência e ductilidade.
Ligas de Titânio	Aumenta a resistência, mas reduz a ductilidade.	Aumenta a resistência, mas reduz a ductilidade.	

Como se pode observar para aços inoxidáveis Austeníticos o Nitrogênio é o gás que tem efeito direto em suas propriedades, sendo que no processo de SAW este é proveniente de contaminação atmosférica na maioria das vezes. Entretanto para este processo deve-se levar em consideração também a absorção do Oxigênio, pois dependendo do nível de acidez do fluxo utilizado

podem-se ter larga porcentagem de SiO₂, e a partir de sua decomposição eleva o nível de Oxigênio, por exemplo.[7]

O aço fundido em contato com a molécula de N₂, pode resultar na dissociação deste último pela reação 1, nas próximas considerações será utilizado o N₂ como exemplo, mas pode-se considerar valido pra O₂ e H₂ também.



A letra N sublinhada significa dissolução no metal fundido. Para a termodinâmica o equilíbrio da concentração de N dissolvido no metal fundido é uma relação com a temperatura atuante e pode ser representada pela formula 5:

$$\ln K_N^d = \ln\left(\frac{[N]}{\sqrt{p_{N_2}}}\right) = \frac{-\Delta G^\circ}{RT}$$
(5)

A qual K_N^d é a constante de equilíbrio da reação, baseada na dissolução do gás N₂ a uma data pressão p_{N₂} (em atm), temperatura T (em K). A variável DG° representa a energia livre de formação (em calorias por mol, valores tabelados) e R a constante do gás 1.987 cal/ (K mol).

Entretanto como descrito na Lei de Sievert a dissolução de um gás diatômico em metal fundido também pode ser descrito pela formula 6:

$$[\underline{N}] = K_N^d \sqrt{p_{N_2}}$$
(6)

Em um arco elétrico, entretanto, parte das moléculas de N₂, podem ser dissociadas (ou mesmo ionizadas) abaixo da temperatura correta, no arco de plasma.

Ao se comparar a dissolução do gás N₂ com a do átomo de N, pode-se observar que para uma mesma absorção deste por parte do metal fundido é necessária uma pressão diferenciada. Por exemplo, dentro da mesma condição de temperatura 1600°C e um DG° padrão para uma concentração de [N] = 0.045wt% é necessário uma p_N = 1 atm para o N₂, enquanto que para o átomo de N é necessário somente p_N = 2 .10⁻⁷.

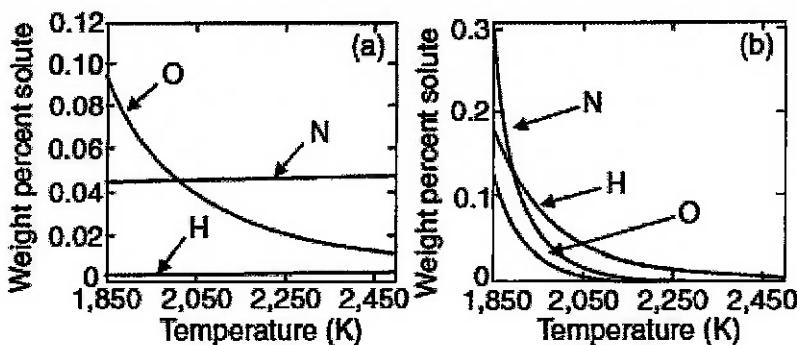


Figura 2.14 Equilíbrio de concentração para O, N e H Diagrama WRC-1988.

Estudo realizado com TIG em aço carbono.[7]

O Oxigênio pode ser considerado como o reagente químico mais importante para a definição da composição química final do metal de solda, e consequentemente sua estrutura e propriedades.

Durante o tempo de existência a gota na transferência fica exposta a uma temperatura de 1900°C e envolvida por moléculas de Oxigênio, a qual vai reagir com os elementos metálicos formando óxidos e estes fluem para a escória. O gás Oxigênio é ligado diretamente com a qualidade da solda através de três fatores: nível de inclusões, aparecimento de porosidade e redução endurecimento.

O Oxigênio pode ser introduzido na poça de fusão por diversos fatores como: contaminação pelo ar atmosférico, reação entre metal-escória, dissociação dos óxidos presentes nos fluxos ou revestimento dos eletrodos, contaminação do metal de base.

A solubilidade do Oxigênio no ferro líquida puro é de aproximadamente 1600ppm a pressão de 1 atm (kPa), durante a solidificação essa solubilidade cai para 860ppm a 1500°C no δ-Fe. A maioria das ligas metálicas presentes no metal líquido diminui a solubilidade do Oxigênio através do equilíbrio das reações de desoxidação. Sendo que estas ocorrem em duas etapas durante a soldagem, primeiro na poça de fusão e depois durante a solidificação, onde também há a formação de inclusões nas regiões intergranulares [10]

Altas concentrações de Oxigênio na poça de fusão aumentam proporcionalmente as reações de desoxidação. Na Figura 2.15 as linhas sólidas demonstram à concentração de Oxigênio na solução para cada desoxidante e as linhas tracejadas as curvas previstas para estes desoxidantes. Há alguns desvios entre as curvas devido a interação dos desoxidantes com outros elementos de liga, caso a concentração de um determinado elemento metálico e do Oxigênio ultrapassem o nível de equilíbrio, acarretará a formação de inclusões. A ordem termodinâmica para a formação de óxidos primários seria:



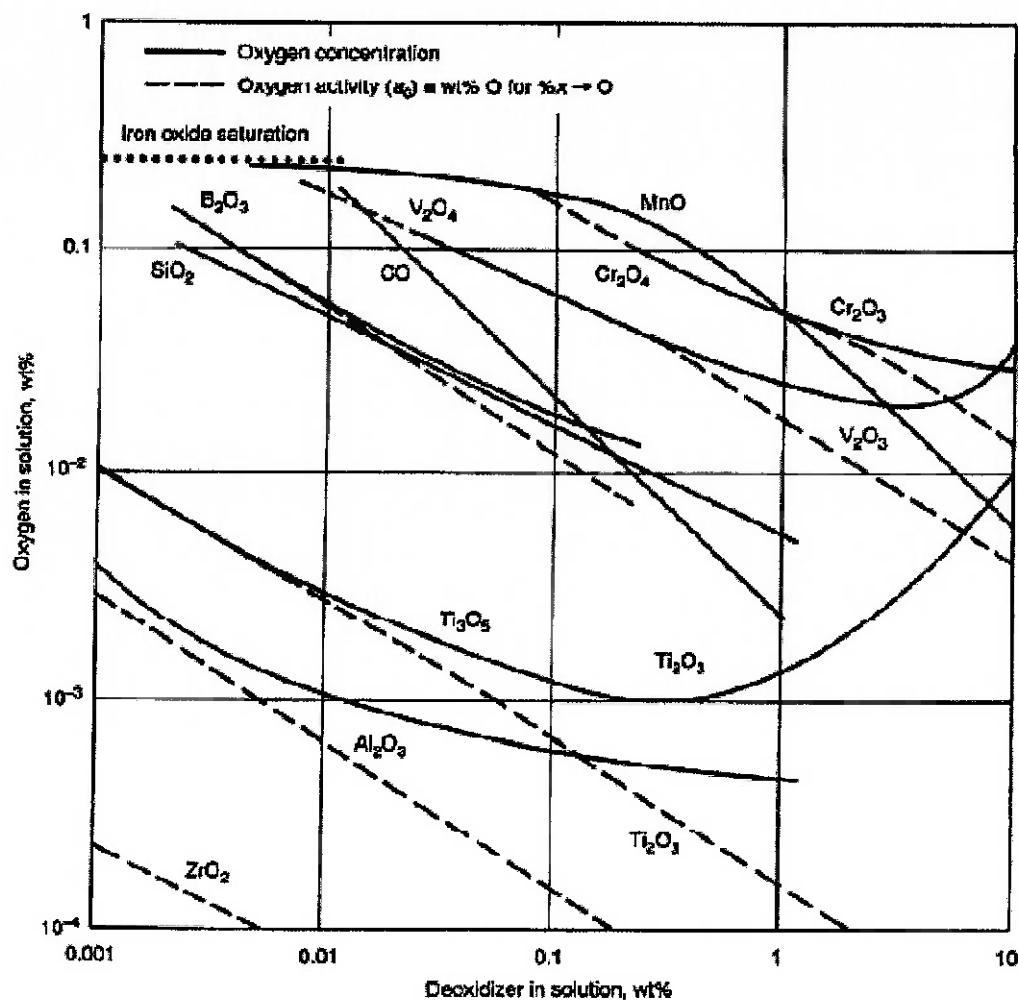


Figura 2.15 Equilíbrio de desoxidação para ligas de ferro a 1600°C [10].

Um excesso de Oxigênio no metal de solda, e consequentemente inclusões de óxidos podem levar a uma deterioração das propriedades mecânicas no metal de solda, por exemplo, algumas inclusões podem agir como o ponto de partida da fratura. Além de que inclusões de óxidos e Oxigênio na poça de fusão podem reagir com o Carbono e formar o gás CO durante a solidificação, promovendo porosidades no cordão de solda. A adição de desoxidantes como Al, Ti, Si e Mn reduzem essa probabilidade de formação de porosidade.

A figura 2.16 mostra os resultados no teste de impacto caem conforme aumenta a concentração de Oxigênio. Entretanto, se a proporção de ferrita

acicular aumenta no metal de solda, em conjunto do aumento da concentração de Oxigênio, os resultados no teste de impacto podem em algumas situações aumentar.

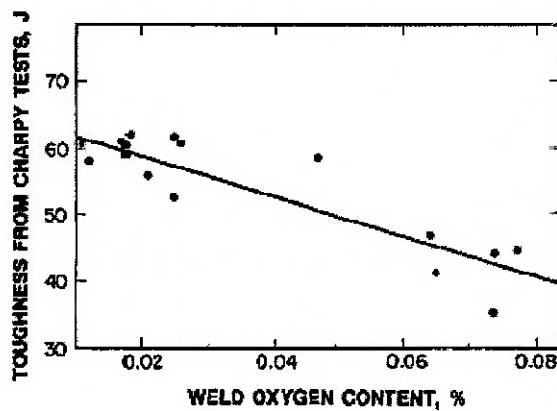


Figura 2.16 Relação entre resultados no teste de impacto a -20°C e a concentração de Oxigênio no metal de Solda. Estudo feito em aço carbono [7].

Fluxos básicos, entretanto, podem gerar alguns inconvenientes. Normalmente estes têm uma maior tendência a absorver umidade, o que pode resultar em um aumento da concentração de Hidrogênio e Oxigênio consequentemente uma fragilização do metal de solda, caso não seja feita uma secagem correta do fluxo.

2.5.3.2 REAÇÃO NA POÇA DE FUSÃO

Dentre as reações que ocorrem na poça de fusão obtém-se como produtos tanto gases como uma fase condensada. No caso do gás há geração de bolhas de gás como descrito no item anterior. Um exemplo de geração de gases é o CO resultante da reação do Oxigênio com o Carbono dissolvido na poça de fusão, mas a quantidade de CO produzido vai depender do nível de elementos

desoxidantes que se tem na poça de fusão, ou seja, a quantidade de elementos que apresentam uma maior afinidade pelo Oxigênio do que o Carbono, reagindo em seu lugar.

No diagrama de energia livre de formação de óxidos, os elementos mais propícios a ação desoxidantes são aqueles que estão localizados abaixo das linhas dos elementos que vão ser oxidados, conforme demonstrado na Figura 2.17. Exemplo de elementos normalmente utilizados como desoxidantes é o manganês, silício para aços e ligas de cobre, o fósforo para cobre e o titânio e alumínio para liga de cobre e níquel.

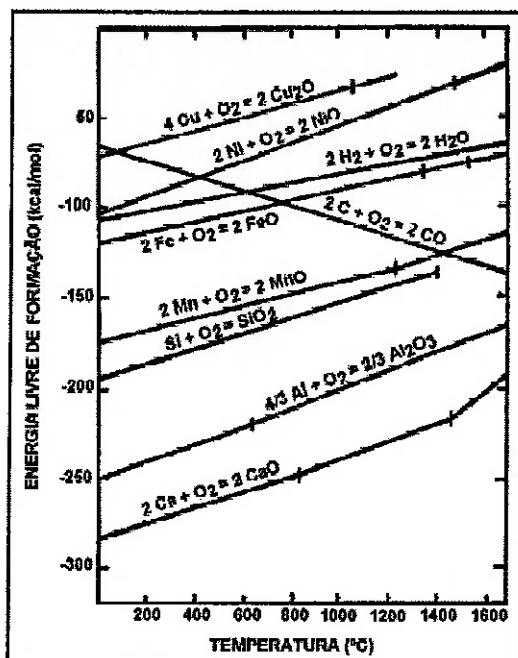


Figura 2.17 Diagrama de energia livre padrão para a formação de alguns óxidos comuns [6].

O outro produto gerado das reações na poça de fusão é os componentes de uma fase condensada insolúvel, a qual dá origem a escória e possíveis inclusões

na solda. Um fator muito importante quando se tem um processo com vários cordões de solda sobrepostos é a retirada completa da escória (utilizando processo manual ou físico), para evitar que parte desta fique presa entre os cordões, gerando uma descontinuidade do cordão de solda.

Já as inclusões não metálicas microscópicas se formam quando a fase condensada não consegue atingir a superfície da poça de fusão antes de sua solidificação. Essas inclusões são tanto maléficas como benéficas para a solda. Uma concentração muito grande de inclusões prejudica as propriedades mecânicas, dentre elas a resistência a impacto e ductilidade. Além de que pode haver a formação de um produto com ponto de fusão superior ao material da poça de fusão, agindo desta maneira como uma barreira física e dificultando a formação da poça. Mas ao mesmo tempo as inclusões são necessárias para determinar a formação de microestrutura da solda.

Existem alguns casos em particular onde o gás formado na poça de fusão não reage com outros elementos e permanece dissolvido na solda, sem formar inclusões, porosidade ou dificultar a formação da poça de fusão, mas posteriormente pode levar a formação de precipitados fragilizando a solda. Um exemplo seria a absorção de Oxigênio em soldas de ligas de titânio, zircônio e tântalo [6].

2.5.3.3 FORMAÇÃO DE INCLUSÃO

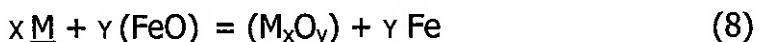
A formação de inclusões é o resultado de reações entre ligas metálicas e elementos não metálicos, ou por enclausuramento mecânico de escórias não

metálicas ou partículas não refratárias. Inclusões podem ser: óxidos, sulfetos, nitritos, carbetas dentre outros componentes e fases.

Esses óxidos e óxidos complexos ocorrem frequentemente em uma região que influencia a microestrutura do metal depositado. Utilizando somente considerações termodinâmicas na análise das reações escória-metal, existem algumas reações consideradas primordiais para descrever a formação de inclusões:



Sendo que os componentes sublinhados M e O, estão dissolvidos no metal, e:



As constantes de equilíbrio K_1 e K_2 das duas reações acima são:

$$K_1 = \frac{(A_{M_xO_y})}{[a_M]^x [a_O]^y} \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{(A_{M_xO_y})}{[a_M]^x [a_{FeO}]^y} \quad (10)$$

Onde a_i , é a concentração do componente i.

O a composição do metal depositado pode ser estimado pelas quatro reações acima, além de se poder a tendência das reações termoquímicas na poça de fusão. Entretanto os resultados da composição química no metal de solda obtido na realidade podem vir a ser diferentes do calculado devido à segregação de elementos de liga durante a solidificação. [10]

A segregação de solutos na interface da fase líquida com a sólido/líquido podem atingir altos níveis de concentração regiões interdendríticas durante a solidificação do metal de solda como demonstra na figura 2.18.

Desprezando a difusão sólida, a composição química do soluto na fase líquida com a sólido/líquida pode ser calculada pela regra da alavanca para “não equilíbrio” ou a formula 11 de Scheil .

$$C_L = C_0 F_L^{K-1} \quad (11)$$

Onde C_0 é a concentração em massa na poça de fusão, C_L é a concentração do soluto na fase líquida na interface e k é a constante de equilíbrio.

:

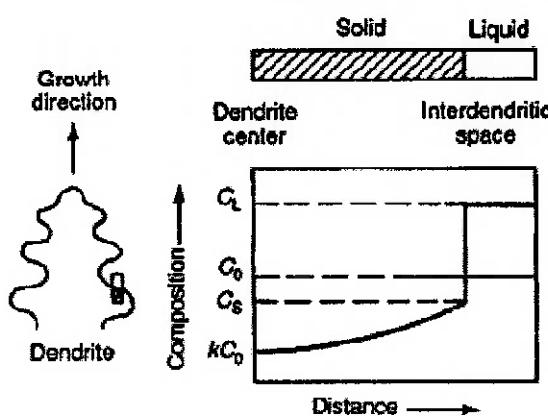


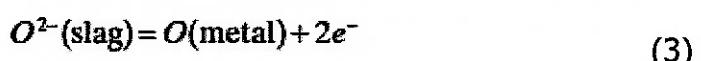
Figura 2.18 Esse esquema demonstra a composição do sólido e líquido modelado pela Equação de Scheil. Assumindo que haja uma difusão completa na fase líquida e isento de difusão no sólido. [10]

2.5.3.4 REAÇÕES ELETROQUÍMICAS

Na soldagem com SAW podemos utilizar tanto corrente continua na polaridade negativa como na positiva, ou seja, o arame-eletrodo pode tanto ser reduzido como oxidado dependendo da polaridade utilizada. Ou ainda, como utilizado neste trabalho tem-se a corrente alternada, que gera uma troca continua das polaridades, invertendo a posições das reações em tempo integral da soldagem.

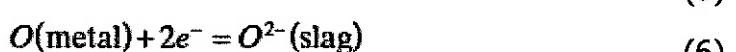
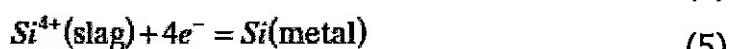
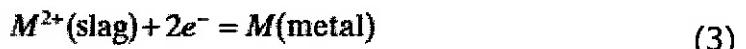
Essa troca de polaridade tem sua frequência ajustada podendo variar de 20Hz a 100Hz, ou seja, controla-se quantas vezes haverá a inversão da corrente por segundo.

Considerando primeiramente as reações no anodo (pólo negativo), tem-se as reações de oxidação, reações 2 e 3:



Essas reações ocorrem na interface da ponta do eletrodo com a escória quando o eletrodo está no positivo. Ou na interface entre a poça de fusão e a escória quando o eletrodo está no negativo. Sendo assim a oxidação perde elementos de liga e aumenta o nível de Oxigênio no anodo.

Já no catodo (polaridade positiva) tem-se as reações de redução.



As duas primeiras reações são as reduções dos cátions metálicos a partir de escória e a terceira reação é a remoção (refino) de Oxigênio proveniente do metal. Essas reações ocorrem na interface da ponta do eletrodo com a escória quando o eletrodo está com a polaridade negativa. Ou ocorrem na interface da poça de fusão com a escória quando o eletrodo está positivo. [7]

A densidade de corrente é muito maior na interface da ponta do eletrodo com a escória do que na interface da poça de fusão com a escória. Portanto, as

reações na ponta do eletrodo podem exercer uma grande influência na composição do metal de solda, mais do que aquelas da poça de fusão.

O aço Carbono contém 0,18% C, 1,25% Mn e 0,05% Si é soldado com o processo SAW com um arame de baixo Carbono 0,06% C, 1,38% Mn e 0,05% Si com um fluxo de 11,2% SiO_2 , 18,14% Al_2O_3 , 33,2% MgO , 25,3% CaF_2 , 6,9% CaO e 1,2% MnO . A figura 2.19 mostra o Oxigênio contido na ponta fundido do eletrodo fundido e nas gotas destacadas em ambas as polaridades, a concentração de 20ppm de Oxigênio no arame está apenas como uma referência.

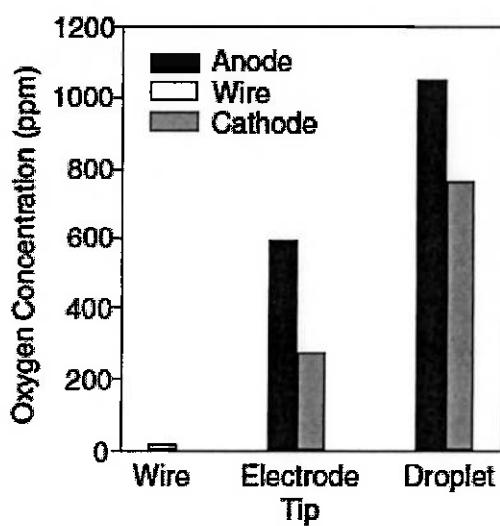


Figura 2.19 Concentração de Oxigênio no arame de solda, na ponta do eletrodo e nas gotas de metal líquido em ambas as polaridades. [7]

O aumento significante de Oxigênio nas pontas dos eletrodos é evidente em ambas as polaridades. Esse excesso é proveniente da decomposição de óxidos provenientes dos fluxos e da atmosfera.

A ponta do eletrodo anódica tem em torno de duas vezes mais Oxigênio do que uma ponta de eletrodo catódica. Essa diferença de Oxigênio se da devido o aumento de Oxigênio no anodo e a remoção deste mesmo do catodo.

Em ambas as polaridades as gotas destacadas contém mais Oxigênio do que a ponta do eletrodo fundida, isso se dá devido as reações eletroquímicas que ocorrem entre as gotas e o fluxo em decomposição, depois que essa se solta da ponta do eletrodo e atravessa o jato de plasma.

Já as gotas anôdicas têm mais Oxigênio, pois foram geradas de eletrodos com polaridades negativas (anodos) que apresentam uma maior concentração deste elemento devido as reações de oxidação. [7]

A Figura 2.20 demonstra a mudança de concentração de Si na poça de fusão para ambas as polaridades.

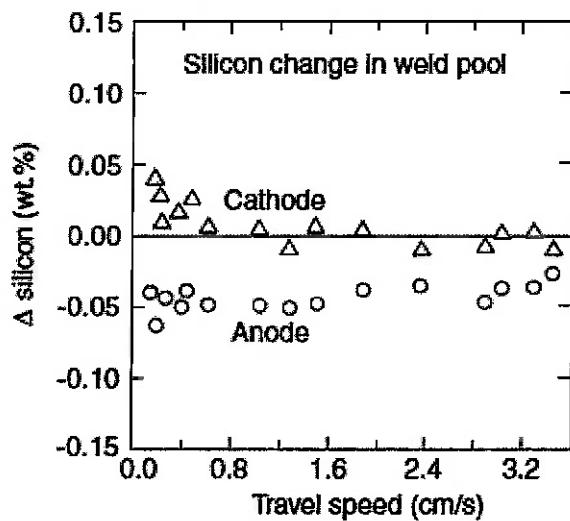


Figura 2.20 Concentração de Si quando o eletrodo está no negativo e no positivo. [7]

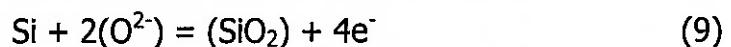
Uma vez que exista uma abundância de Oxigênio devido a decomposição do fluxo, a perda de Si a partir da poça de fusão devido a reações termoquímicas é bem provável:



Sendo que essa perda de Si recuperada através da reação catódica de redução, conforme reação 8:



Entretanto a perda é agravada pela reação de oxidação no anodo reação 9:



Consequentemente a perda de Si é mais significante no anodo do que no catodo.

Já a figura 2.21 demonstra as mudanças de concentração de Mn na poça de fusão para ambas as polaridades.

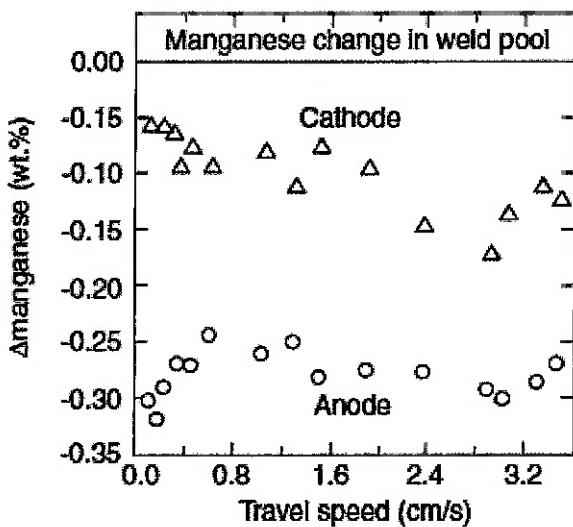


Figura 2.21 Concentração de Mn quando o eletrodo está no negativo e no positivo. [7]

A perda de Mn a partir da poça de fusão para a escória é significante em ambos os casos, pois este é o mais rico dos elementos de ligas presentes na poça de fusão (considerando o metal de base e o material de adição) e o MnO é mais “podre” dos óxidos que compõem o fluxo.

Assim sendo, a reação termoquímica, reação 10:



Pode se deslocar facilmente para a direita e causar uma perda considerável de Mn. Além de que este tem uma pressão de vapor alta, promovendo sua vaporização a partir do metal líquido, sendo, portanto outro ponto de perda de Mn.

A perda de Mn é parcialmente recuperada pela reação de redução no catodo.



Entretanto é agravada pela reação de oxidação no anodo.



Consequentemente a perda de Mn é mais significante no anodo do que no catodo.

2.5.4 FORMAÇÃO DE ESCÓRIA

A escória é uma mistura estruturas cristalinas, a qual é formada sobre o metal de solda já solidificado de maneira a proteger a superfície deste último da oxidação durante o resfriamento. A escória deve ter algumas propriedades físicas como: temperatura de fusão inferior a do aço, ou seja, inferior a 1500°C, densidade menor que a do aço de maneira que toda a escória flua para a parte externa da solda, evitando que se formem inclusões de escória do meio da

solda, deve ter uma viscosidade adequada para cada consumível, de maneira que não escorra sobre a poça de fusão e apague o arco, e por último na maioria dos casos deve destacar facilmente da solda após resfriamento.

Os principais constituintes da escória são os titanatos, silicatos e aluminas, sendo que os cátions com alta valência desses componentes promovem a formação de compostos vitrios da escória. Fluxos com predominância de alguns silicatos, como o de manganês, têm uma tendência a produzir um metal de solda com altos valores de Oxigênio. Enquanto o oposto ocorre com fluxos à base de titanatos e aluminas, porém estes apresentam uma escória de alta viscosidade. Alguns exemplos de matérias minerais e cerâmicos que são formadores de escória são: rutilo, titanato de potássio, ilmenita, alumina, feldspato, dióxido de manganês, fluorita, Magnesita entre outros. [7 e 10]

2.5.4.1 REAÇÃO METAL – ESCÓRIA

As reações entre a escória em formação e o metal fundido estão relacionadas com as reações termoquímicas, como por exemplo, a decomposição do fluxo de proteção, a oxidação dos elementos no metal líquido e a desulfurização no metal de solda equações reações 13 e 14.



Perante a alta temperatura próxima ao jato de plasma do arco elétrico, todos os óxidos estão susceptíveis a decomposição e formação de Oxigênio, conforme

discutido anteriormente. Pode-se considerar que durante a soldagem a estabilidade dos óxidos metálicos segue a seguinte ordem, de maneira decrescente: (I) CaO₂ (II) K₂O, (III) Na₂O e TiO₂, (IV) Al₂O₃, (V) MgO e (VI) SiO e MnO. (FeO não está incluso, mas também se pode considerar que seja instável). Como exemplo seguem as reações 15 e 16 do SiO₂ e MnO



Considera-se que fluxo com baixas concentrações de FeO (<10% FeO), SiO₂ e MnO são as fontes primárias de contaminação por Oxigênio e a estabilidade dos óxidos metálicos na soldagem não está direcionada diretamente com suas estabilidades termodinâmicas

2.5.5 CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DO FLUXO

Conforme descrito anteriormente o fluxo além de protege a poça de fusão, também participa da determinação da composição do metal de solda. Sendo assim de acordo com a composição química de seus constituintes, os fluxos podem ser classificados em 3 grupos:

1-Fluxos Halide: Livres de Oxigênio, sendo direcionados para soldagem de ligas de titânio e alumínio. Como por exemplo $\text{CaF}_2\text{-NaF}$, $\text{CaF}_2\text{-BaCl}_2\text{-NaF}$ e $\text{BaF}_2\text{-MgF}_2\text{-CaF}_2\text{-LiF}$.

2- Fluxos Halide-oxide: são levemente oxidantes, utilizados frequentemente para soldagem de aços de alta-liga. Exemplo de composições $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2$, $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, and $\text{CaF}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$.

3- Fluxos Oxide-type: apresentam maior índice de oxidação, sendo destinada a soldagem de aços baixa liga e aço Carbono. Caso este tipo de fluxo seja utilizado em soldagens de metal reativo como ligas de titânio o metal de solda pode ser contaminado por Oxigênio. Exemplo de composições: MnO-SiO_2 , FeO-MnO-SiO_2 e $\text{CaO-TiO}_2\text{-SiO}_2$.

Dentro dos fluxos compostos por óxidos, têm-se mais três classificações, também conforme sua composição química:

1º Óxidos ácidos (dióxidos): aqueles que são “receptores” do O_2^- . Classificados por ordem decrescente de acidez: SiO_2 , TiO_2 , P_2O_5 , V_2O_5 ;

2º Óxidos básicos (monóxidos), aqueles que são “doadores” de íons livres de O_2^- . Classificados por ordem decrescente de basicidade: K_2O , Na_2O , CaO , MgO , BaO , MnO , FeO , PbO , Cu_2O , NiO ;

3º Óxidos anfóteros (neutros): Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , V_2O_3 , ZnO .

2.5.5.1 ÍNDICE DE BASICIDADE

Inicialmente o índice de basicidade era utilizado na produção de aço para avaliar a capacidade da escória de remover o enxofre do aço fundido.

Posteriormente começou a ser utilizado também para indicar a capacidade de oxidação do fluxo, ou seja, a relação entre o fluxo com a composição química do metal de solda. O índice de basicidade é calculado através da formula 12:

$$IB = \frac{\sum (\% \text{ de óxidos básicos})}{\sum (\% \text{ de óxidos não básicos})} \quad (12)$$

Como por exemplo, a formula 13:

$$\begin{aligned} IB = & \underline{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Li}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + \frac{1}{2}(\text{FeO} + \text{MnO})} \\ & \text{SiO}_2 + \frac{1}{2}(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2) \end{aligned} \quad (13)$$

Os óxidos acima são as porcentagens em peso dos componentes do fluxo. A partir do resultado encontrado pode-se classificar o fluxo como: ácido quando índice de basicidade é inferior a 1,0; neutro para índice de basicidade entre 1,0 e 1,2 e básico para índice de basicidade superior a 1,2. Em geral quando é um valor muito alto, significa que a solda está praticamente isenta de inclusões não metálicas, ou seja, com uma baixa concentração de Oxigênio [10].

A Figura 22.2 demonstra bem a correlação entre o índice de basicidade calculado pela equação 12 em relação ao nível de Oxigênio. Comprovando que a concentração de Oxigênio diminui conforme o índice de basicidade aumenta, até se tornar constante por volta de 250 ppm a alto índice de basicidade. Em geral resultados altos de basicidade, limpam a solda das inclusões não metálicas, uma vez que tem baixo nível de Oxigênio.

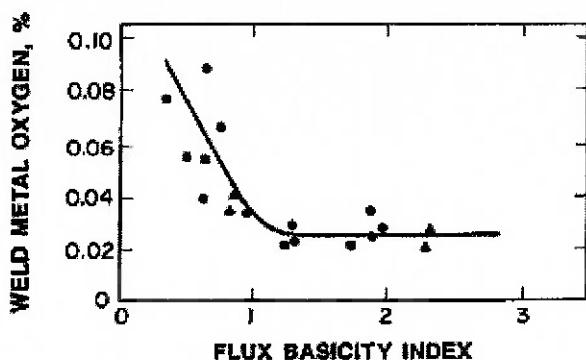


Figura 2.22 Concentração de Oxigênio em função do índice de basicidade do fluxo. [7]

A correlação entre o Oxigênio do metal de solda, que é uma indicação do resultado de impacto da soldagem, com a basicidade aceitável para alguns fluxos, especialmente para aqueles que têm em sua base CaO, MgO e SiO₂. Entretanto a formula 13 de Basicidade não pode ser utilizada na correlação entre resistência e impacto para soldagens feitas com fluxos com altas concentrações de Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂, MnO, FeO, e CaF₂. Embora se tenha inúmeras variações da fórmula de basicidade, nenhuma dessas é flexível a ponto de representar corretamente fluxos com alto nível de óxidos anfóteros. Em geral não se pode levar como uma regra o índice de basicidade para se prever o quanto terá de Oxigênio da solda ou as propriedades do metal de solda, uma vez que este não leva em consideração propriedades físicas dos fluxos, nem a cinética de reações na poça de fusão.

2.6 PROCESSO DE SOLDAGEM ARCO SUBMERSO

Por volta do ano de 1935 surgia um novo processo de soldagem que veria para inovar no conceito de “rendimento” e “eficiência” dentro da soldagem denominada SAW – Submerged Arc Weld. Este processo consiste na utilização de um eletrodo sendo ele tubular, sólido ou fita. Com um fluxo granulado para proteger a poça de fusão, daí a origem do nome, uma vez que o arco elétrico fica submerso no fluxo.

Inicialmente este processo foi direcionado para chapas de aço Carbono na indústria naval, conforme se dominava o processo este foi estendido aos demais aços, inclusive para o inox que será o foco deste estudo.

Hoje o processo de arco submerso está presente principalmente nos segmentos de offshore, tubulações, estaleiros, caldeiraria pesada, geração de energia, revestimento de peças para desgaste, dentre outros. E pode ser aplicado em todos os tipos de materiais uma vez se utilizando os consumíveis corretos.

Nos últimos anos pode-se dizer que a grande inovação neste processo foi à utilização de tecnologia de “controle da onda quadrada” – *Square Wave* em fontes inversoras para arco submerso, possibilitando um maior controle e melhores resultados na solda. O que poderia também ajudar a se obter melhores resultados na soldagem de aços inoxidáveis que necessitam a tender requisitos de impacto.

2.6.1 PROCESSO

Como os demais processos de soldagem por arco elétrico é instaurado entre o eletrodo e a peça a ser soldada, entretanto diferente dos demais neste caso o arco elétrico não é visível, não se necessita a utilização de máscara para soldagem, pois este arco elétrico fica submerso em um fluxo granulado.

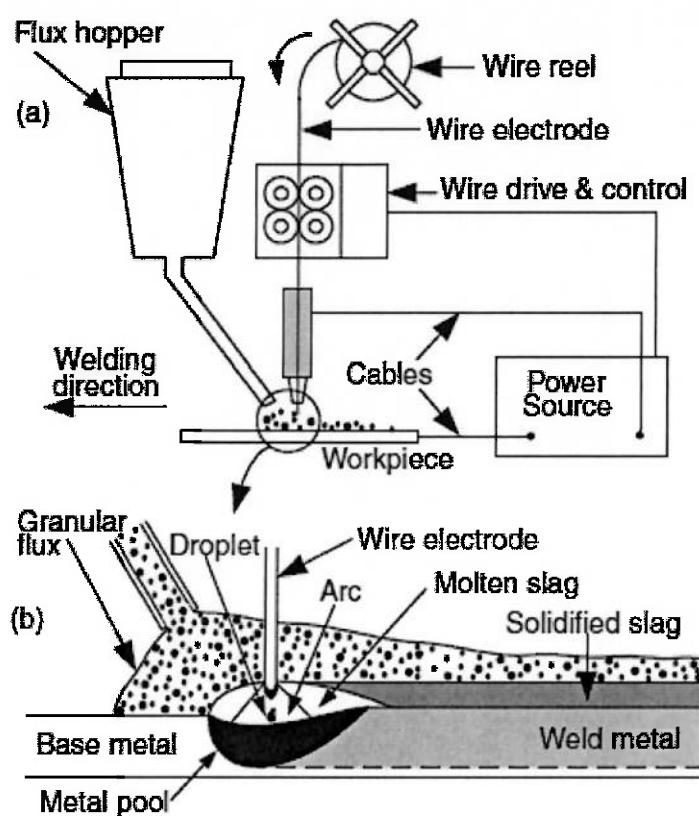


Figura 2.23 Esquema de soldagem por arco submerso. [7]

Neste processo há geração de escória destacável após solidificação do metal líquido e devido à necessidade de utilização do fluxo granulado o processo se restringe a posição plana e horizontal, uma vez que não tem como manter o fluxo envolta do arco elétrico na posição vertical ou sobre-cabeça sem deixá-lo cair. [3]

Pode-se utilizar desde um arame (eletrodo) até seis destes simultaneamente na mesma poça de fusão, com a finalidade de aumentar ainda mais a eficiência do processo. Quando se utiliza dois arames conectados em paralelo em um mesmo bocal e a uma mesma fonte de energia, denomina-se twin-arc. Já quando se tem dois ou mais arames cada um com uma fonte de energia o processo denomina-se Tandem-Arc, a qual dentre suas vantagens destaca-se a possibilidade de preenchimento de chanfros com espessuras elevadas com uma maior velocidade.

No arco submerso não há geração de fumos metálicos nem de respingos, sendo que o cordão de solda formado tem uma aparência uniforme e com bom acabamento. Quando comparado com os demais processos a arco elétrico tem-se uma elevada taxa de deposição, uma vez que se consegue trabalhar com uma alta densidade de corrente.

Integrado a essa alta taxa de deposição, tem-se um alto rendimento e eficiência uma vez que consegue soldagem com velocidade elevadas e sem interrupção.

2.6.2 EQUIPAMENTOS

Para se soldar com arco submerso é necessário basicamente de uma fonte de corrente constante e/ou tensão constante, alimentador de arame, tocha, um cabeçote de descolamento e controle, suporte para bobina, sistema de circulação para o fluxo e forno para secagem do fluxo.

Mais comumente o sistema é automático, onde o operador apenas comanda a solda por um painel específico ou pelo próprio controlador do equipamento. Há casos em que se utiliza um trator para a soldagem, sendo um cabeçote que anda por um trilho, ou sistema magnético ou simplesmente por um linha reta e neste está acoplado o suporte da bobina e um reservatório de fluxo. E por último sendo o menos comum, há a processo de SAW semiautomático, a qual consiste em uma tocha manual, refrigerada a água, onde o próprio operador a conduz. Este caso é utilizado para soldagem em partes de difícil acesso, com curvas e pequenos reparos.[3]

2.6.3 CONSUMÍVEIS

No processo de SAW são utilizados normalmente dois consumíveis, eletrodo e fluxo, sendo que sua combinação leva ao resultado final esperado tanto químico como mecânico, justificando por que nas classificações conforme AWS ou EN sempre deve ser levado em consideração a combinação. Entretanto há casos especiais onde se considera um acréscimo do terceiro consumível. Isso se dá normalmente em soldagem de placas para desgaste, a qual é colocado sobre a chapa a ser soldada pequenas quantidades de Carbono em pó (grafite) com o objetivo de formar carbonetos/carbetos para aumentar a dureza do material.

Os eletrodos podem ser arames sólidos, arames tubulares ou fitas, fornecidos em carretéis, barricas ou Spiders. Essa versatilidade de combinações torna possível a soldagem com arco submerso em diversas situações, tanto em aço Carbono, como em inoxidáveis e aços ligados, atendendo a diferentes

necessidades. Na escolha de um consumível sempre é necessário verificar junto do fabricante qual a combinação que ele recomenda para o fluxo. Considerando os arames, estes podem ser de diâmetros de 1,6 (para aplicação com Twin Arc) até 5,4mm.

No processo de SAW o eletrodo tem como função conduzir a corrente elétrica, fornecer material de liga e desoxidantes, adicionar elementos químicos ao cordão. Considerando a norma AWS D1.1 o eletrodo é o real formador do cordão de solda, o fluxo está presente para proteger a poça de fusão, dentre outras funções, contudo não é um material de adição.

Já os fluxos para soldagem a SAW é um material granulado, com condições de suportar as altas correntes de soldagem utilizada pelo processo. Sendo constituídos por matérias-primas cerâmicas, minerais, óxidos, ferro-liga e solução de silicato. Tem como função proteger a poça de fusão de contaminante da atmosfera, estabilizar o arco elétrico, fornecer elementos de liga, influenciar na geometria do cordão, formador de escória, fornecer elementos químicos para a limpeza da solda como desoxidantes.

Inicialmente os fluxos são classificados conforme seu modo de fabricação, podendo ser fundido ou aglomerado. No primeiro caso é quando as matérias-primas são misturadas em um forno a temperatura de 1300°C a 1500°C, promovendo a fusão destas. Este fluxo fundido é derramado sob um jato de água de maneira a resfriá-lo rapidamente formando grãos de aspecto vítreo. Passando em seguida por um peneiramento e quando necessária moagem. Este tipo de fluxo tem excelente homogeneidade, é isento de formação de gases na poça de fusão, não são higroscópicos. Entretanto não se consegue adicionar

desoxidantes ou ferro-liga em sua composição devido as altas temperaturas de processo e apresentam um elevado custo de fabricação, itens que o deixaram praticamente em desuso.

O fluxo que é realmente utilizado no mercado de soldagem é o fluxo aglomerado, o qual é fabricado a partir de matérias-primas minerais, cerâmicas e ferro-liga sendo todas granuladas conforme a especificação do fabricante. Conforme a formulação do produto a ser fabricado as matérias primas são colocadas em um misturador, onde se adiciona água e solução de silicato para aglomeração do fluxo. O tempo de mistura varia conforme o produto, mas o importante é que no final desta a aparência do fluxo (granulometria) seja o mais parecido com o produto final, pois nas etapas seguintes não se terá alteração significativas na granulometria do produto. Posteriormente a mistura o material segue para a calcinação, que é feita em um tubo rotativo com diâmetro e comprimento variáveis, a temperatura utilizada pode variar entre 700 a 800°C. Em seguida o material passa por um tubo rotativo, também de diâmetro e comprimento variáveis, para resfriamento do fluxo, sendo que este pode ser feito unicamente com o auxilio da aletas interna ou o tubo também pode estar parcialmente imerso em água para auxiliar na troca térmica. A última etapa antes de embalar o material é fazer uma separação granulométrica, que consiste em passar o produto por uma série de peneira para separação das partículas de tamanho superior ao especificado e o excesso de partículas finas. [3]

Dentro dos fluxos aglomerados tem se a divisão em três grupos conforme as composições químicas destes:

Fluxos Ativos: neste grupo estão os fluxos com maiores níveis de Mn e Si que atuam como agentes desoxidantes e proporcionam resistência a formação de trincas e porosidade, uma vez que a maioria da aplicação deste consumível é em linha de produção (rodas, tubos e botijões) e as juntas a serem soldadas não passam por uma limpeza eficaz, apresentando muitas vezes respingos de óleo, graxa e uma superfície não lixada. Entretanto a soldagem se restringe a no máximo dois passes, pois mais do que isso começa a se ter uma deposição excessiva de Mn e Si que podem provocar trinca a quente. Este tipo de fluxo é muito utilizado para soldagem em velocidades rápidas, tanto em processo de arco simples como múltiplos arames. Proporcionam soldas com bons resultados mecânicos, bom acabamento e baixo nível de defeitos.

Fluxos Neutros: neste caso não se tem elementos químicos que irão afetar consideravelmente a composição química do metal depositado, como elementos de liga. É indicado para soldagem multi-passes em chapas com elevadas espessuras (acima de 25mm) o que direciona sua aplicação para indústria pesadas como naval, offshore, plataformas e power generation. Por não ter concentrações significativas de elementos desoxidantes (Mn e Si) é suscetível a formação de trincas e porosidade causadas por contaminação da chapa a ser solda, sendo assim necessita-se de uma boa limpeza na junta a ser soldada. A composição química do metal depositado dependerá muito do eletrodo a ser utilizado, podem ser fita, arame tubular com liga, arame sólido de aço Carbono, inox, ou ligado.

Fluxo Ligado: são fluxos que tem em sua composição química elementos de liga (como Mo, Cr, Ni além de C, Mn e Si) que fornecem as propriedades desejadas

ao metal de base, direcionado aplicação deste fluxo principalmente para soldagem de revestimento duro. A qual se pode utilizar um arame de aço Carbono convencional e o fluxo fornecerá todo o elemento de liga necessário para proporcionar resistência ao atrito e brasão. Entretanto para que se garanta os resultados desejados é necessário a utilização de parâmetros e procedimento de soldagem adequados.

2.6.4 ONDA QUADRADA

Os inversores de frequência empregados para as fontes de arco submerso permitem a utilização de corrente alternada de onda quadrada. A qual tem como característica a inversão das correntes positiva e negativa em tempo zero, ou seja, sem a extinção do arco. Permitindo uma estabilidade total do arco elétrico com variação de corrente e tensão mínimas.

Com o inversor de frequência é possível balancear a onda quadrada, alterando sua amplitude, intensidade e frequência, através da tecnologia "Alternated Current in Square Wave" (ACSW). Proporcionando um controle da taxa de deposição, diluição, penetração, estrutura metalúrgica e aparência do cordão de solda. A figura 2.24 demonstra o conceito da Square Wave.[4]

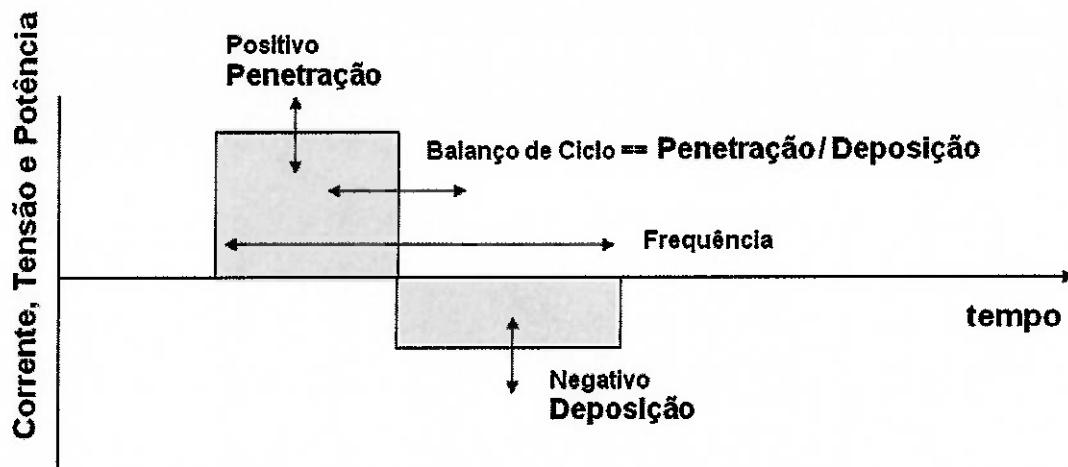


Figura 2.24 Influência de cada parâmetro da onde quadrada. [4]

Ou seja, é uma mescla das características da onda em DC+ ou DC-, uma vez que quando se utiliza a onda DC+ temos o eletrodo no positivo e a chapa no negativo, proporcionando uma maior penetração já que a chapa terá uma “passagem” de elétrons mais intensa levando a um aumento de energia/calor facilitando a fusão do metal de base. Enquanto que na DC- a saída negativa está conectada ao arame, fazendo com que os elétrons passem por este e aumentem sua fusão, ocasionando, portanto uma maior deposição.

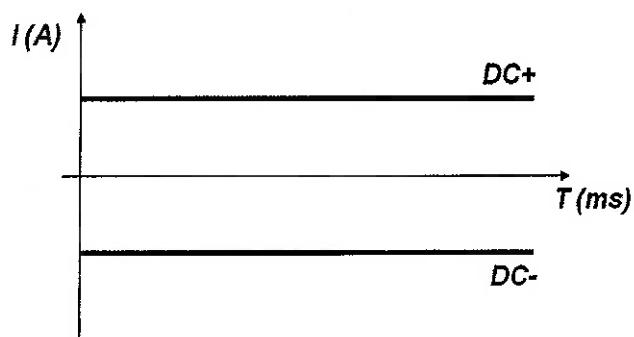


Figura 2.25 Corrente DC+ e DC- [4]

Um dos parâmetros controláveis na onde quadrada é o balanço da onda, a qual determina o tempo em que a onde fica na parte positiva do gráfico, sendo que este ajuste pode ser variável de 25% até 75%. Por exemplo, quando se coloca 30%, significa que 30% do tempo a onde ficará na parte positiva do gráfico e consequentemente os outros 70% do tempo na parte negativa. Com este parâmetro se obtém uma baixa penetração e uma maior deposição, para se obter um resultado oposto a este com alta penetração e baixa deposição necessita-se apenas aumentar o balanço da onde para 75%, por exemplo, deixando, portanto apenas 25% do tempo a onda no negativo. A figura 2.26 exemplifica está explicação.

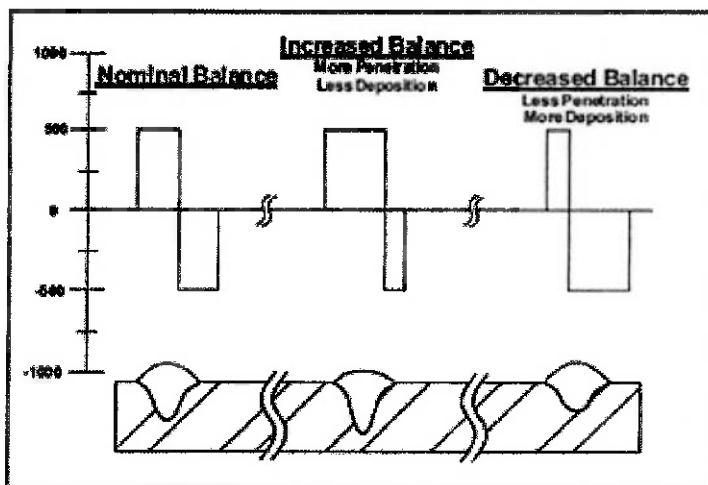


Figura 2.26 Efeito do balance da onda na penetração e taxa de deposição [4]

Um segundo parâmetro controlável é o offset que tem como função ajustar a amplitude da onda e como no balanço este ajuste sempre se refere a parte positiva, entretanto é ajustável entre -25% a +25%. Ou seja, quando temos um parâmetro de -25%, significa que 25% da onda estão no positivo e 75% está no negativo do gráfico, promovendo um resultado de baixa penetração e

alta taxa de deposição. Neste caso quando se ajusta o parâmetro para zero significa que 50% da onda esta para cada polaridade. A figura 2.27 demonstra está explicação.[4]

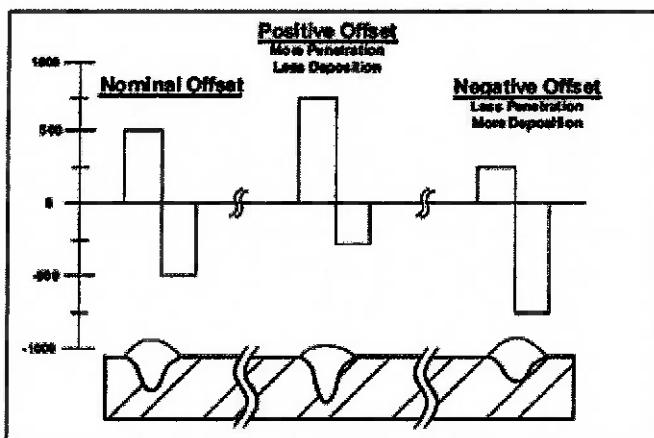


Figura 2.27 Controle de penetração e taxa de deposição através do offset [4]

O último ajuste a ser feito na onde quadrada é a frequência da onda. Normalmente o padrão a ser utilizado é 60HZ, entretanto o equipamento permite um ajuste entre 20 a 100Hz. Com isto consegue-se controlar quantas vezes a onda completa irá se repetir por segundo, ou seja, com 80Hz tem-se a 80 ondas completas em um segundo. Com isto consegue-se melhorar o controle do arco, na transferência e formato do cordão. A figura 2.28 demonstra o efeito da frequência.

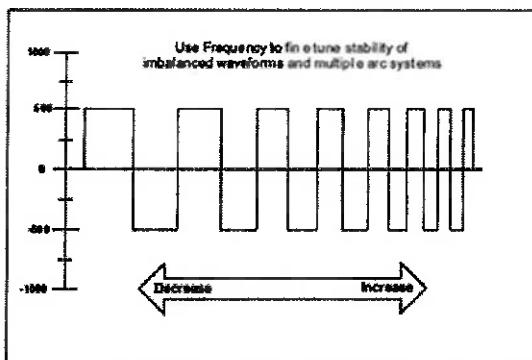


Figura 2.28 Controle da frequência de onda [4]

3. OBJETIVOS.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência na composição química do metal de solda a partir da variação na frequência de onda (20Hz, 70Hz e 100Hz) em adições com arames ER308L e ER309L e arames ER2209 e ER2594.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 SOLDAGEM

Para se avaliar os efeitos da variação de frequência no metal depositado, foram confeccionados corpos de prova, variando a frequência de onda em 3 situações: 20Hz, 70Hz e 100Hz. De maneira a se avaliar a menor e a maior frequência possível dentro da capacidade da máquina e um valor intermediário.

Para essa soldagem utilizou-se uma fonte Power Wave AC/DC 1000SD em conjunto do cabeçote MAXsa 10, da empresa Lincoln Electric. Figura 4.1

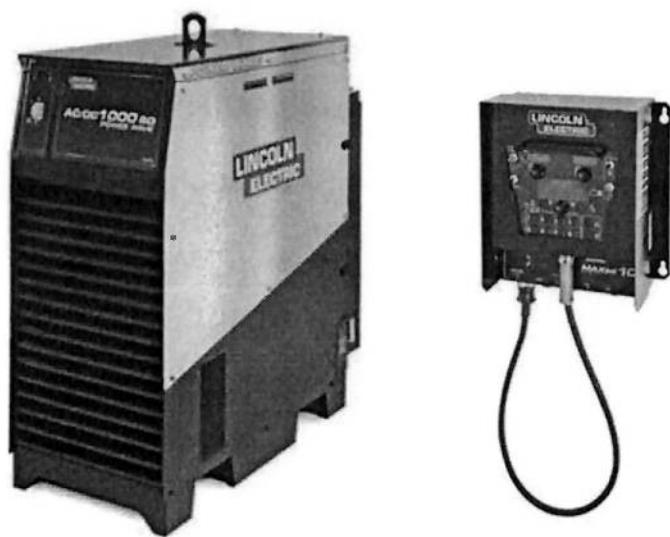


Figura 4.1 Conjunto Power Wave AC/DC 1000SD (esquerda) e cabeçote MAXsa 10 (direita)

Como metal de base tem-se o aço AISI 304L, de espessura de 1in. Na tabela 4.1 tem-se a análise química do metal de base (% em peso).

Tabela 4.1 – Composição química do metal de base.

%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%V
0,018	0,48	0,002	0,029	1,33	8,38	18,16	0,074	0,039
%Al	%Co	%Nb	%Ti	%B	%Cu	%O	%N	
0,003	0,063	0,031	0,0056	0,0004	0,096	0,0039	0,053	

Utilizou-se os consumíveis: o fluxo Neutro Carboox ME (da empresa Lincoln Electric) em combinação com os arames sólidos ER308L e ER309L. E o fluxo SSB (da empresa Metrode) em combinação com os arames sólidos de Duplex ER2209 e Superduplex ER2594. Na tabela 4.2 segue as composições dos arames utilizados, considerando que todos seguem a AWS 5.9.

Tabela 4.2 – Composição química dos arames utilizados.

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
ER308L	0,012	0,41	0,013	0,022	1,88	9,14	19,68	0,29
ER309L	0,02	0,48	<0,01	0,02	2,02	13,96	23,03	0,13
ER2209	0,01	0,43	0,0005	0,017	1,63	8,61	22,89	3,12
ER2594	0,012	0,40	0,0005	0,017	0,36	9,49	25,17	3,90
Elementos	%Cu	%Co	%V	%W	%Ti	%Nb	%N	%Al
ER308L	0,16	0,13	--	--	--	--	0,072	0,004
ER309L	0,06	--	0,06	--	--	0,02	--	0,001
ER2209	0,13	0,044	--	--	--	0,16	0,16	0,007
ER2594	0,099	0,034	0,053	0,01	<0,005	0,01	0,24	---

A confecção dos 'weld pads' foi baseada na norma SFA-5.23/SFA-5.23M, a qual faz referência a soldagem pelo processo de arco submerso com aço de baixa

liga. Sendo assim foram feitas 4 camadas, cada uma com 3 cordões de solda, conforme figura 4.2.

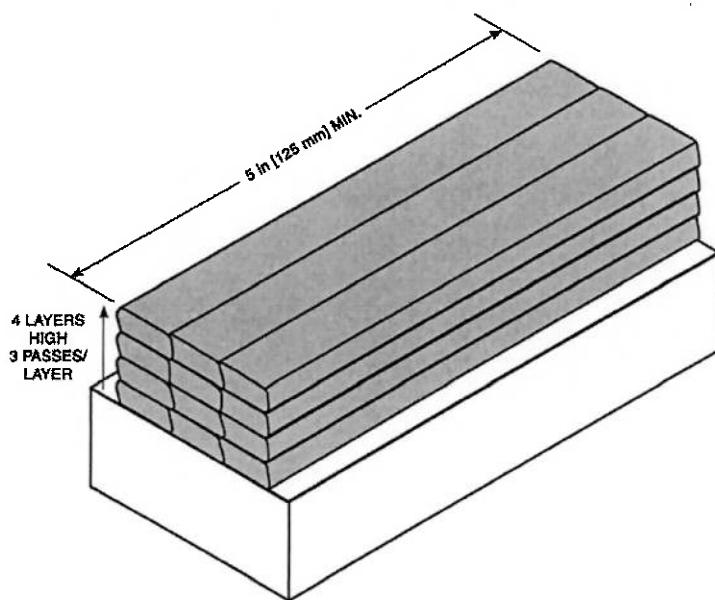


Figura 4.2 Esquema do weld pad para soldagem a arco submerso (12)

As soldagens foram feitas com o programa número 356 e 456 da máquina Power Wave AC/DC 1000SD, ou seja, uma curva de soldagem específica para arame sólido inoxidável de 3,2mm e 2,4mm respectivamente. E significa também a escolha da utilização de tensão constante e onda quadrada. Estipulou-se como padrão a distância de eletrodo de 2,54 cm e uma tensão de 30V para ambos os diâmetros. A velocidade de soldagem e a corrente utilizadas foram ajustadas de modo que se mantivesse a mesma densidade de corrente e a mesma energia de soldagem para ambos os diâmetros, conforme demonstrado nos cálculos a seguir.

Para um arame de 3,2mm, corrente de 450 A e velocidade de soldagem de 18in/min (0,762 cm/s), a densidade de corrente (D) fica:

$$D = \frac{I}{\text{Área do arame}}$$

$$D = \frac{450 \text{ A}}{(3,2^2 \times 3,14) / 4}$$

$$D = 55,95 \text{ A/mm}^2$$

A energia de soldagem (E) é calculada por:

$$E = \frac{I \cdot V}{\text{Veloc. Desl.}}$$

$$E = \frac{450 \text{ A} \cdot 30 \text{ V}}{0,762 \text{ cm/s}}$$

$$E = 17.716,53 \text{ J/cm} = 17,7 \text{ kJ/cm}$$

Para um arame de 2,4mm é importante manter a mesma densidade de corrente. A partir desta hipótese, calcula-se a corrente de soldagem:

$$55,95 \text{ A/mm}^2 = \frac{I}{(2,4^2 \times 3,14) / 4}$$

$$I = 253 \text{ A}$$

Com o valor da corrente calculado e mantendo-se a mesma energia de soldagem, consegue-se calcular a velocidade de soldagem:

$$17.716,53 \text{ J/cm} = \frac{253 \text{ A} \cdot 30 \text{ V}}{\text{Veloc. Sold.}}$$

$$\text{Veloc. Sold.} = 0,42841 \text{ cm/s} = 10,12 \text{ in/mm}$$

Tabela 4.3: Valores de corrente e velocidade de deslocamento utilizados.

	Corrente	Velocidade de deslocamento
2,4 mm	250 A	18,00 in
3,2mm	450 A	10,12 in

4.1.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA PARA ANÁLISE

Após soldados os corpos de prova foram cortados de maneira se eliminar a cratera (final do cordão) e o início do cordão, locais onde se pode ter variação de composição química.

Todos os corpos de prova foram usinados, utilizando-se em uma fresa, para nivelar a superfície e em seguida por uma lixa de mesa rotativa. Este procedimento é necessário, pois para a análise no equipamento de espectrofotometria a superfície a ser analisada deve estar nivelada, lixada em uma mesma direção e não se pode colocar a mão ou em contato com qualquer objeto ou superfície que possa contaminar o material e alterar os resultados químicos.

Para a determinação experimental do teor de ferrita, utilizou-se estes mesmo corpos de prova. Uma vez que não era mais necessária nenhuma preparação deste. E dos mesmos retirou o material necessário para análise de O e N.

4.1.2 ANÁLISES

Para análise química dos 'weld pads', utilizou-se o equipamento de espectrometria ótica (da marca ARL) a qual é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos químicos presentes em uma amostra de maneira quantitativa.

Neste caso o equipamento efetua uma queima, em ambiente inerte, na superfície do material o que provoca uma excitação dos elétrons através da

energia absorvida pelo material. Fazendo com que estes mudem para níveis mais energéticos, deixando o átomo em uma situação instável. Como de maneira geral tudo na natureza tende a retornar ao seu estado de estabilidade, quando este átomo volta ao seu nível energético original, libera essa energia que absorveu. Como cada elemento químico tem um espectro diferente e sua intensidade varia conforme sua concentração, o equipamento consegue identificar cada faixa de espectro e a intensidade de energia possibilitando-o de identificar o material.

Para a determinação de ferrita foram feitos de dois métodos primeiro o teórico através do diagrama WRC-1992 (FN) e o experimental através do equipamento Ferritoscópio Fischer (porcentagem de ferrita). Um modo de medição não destrutivo, que tem como base uma correlação entre o magnetismo emitido pela peça a ser analisada e a concentração de ferrita. Para isso antes da leitura é necessário uma calibração do equipamento, de maneira que este consiga ter um padrão de comparação com o magnetismo emitido pela peça. Para ser realizado o teste somente é necessário após calibração encostar o sensor nas peças a serem analisadas.

Para a determinação do Oxigênio e Nitrogênio utilizou-se o equipamento LECO, que através do processo de cromatografia gasosa determina a quantidade de gás que desprende do material que está sendo analisado através do aquecimento deste. Dos corpos de provas somente é necessário à retirada de um pequeno pedaço de material, apenas metal de solda, e coloca-lo na câmara do equipamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

5.1 ANÁLISES QUÍMICAS

Para todos os weld pads foram feitas cinco análises químicas, de maneira a se obter uma média de resultados e com esses fazer as demais análises. As quais são:

- 1- Avaliação da variação de percentual dos elementos químicos: comparação dos resultados médios obtidos em cada frequência para determinado arame.
- 2- Comparação das variações para cada elemento químico entre as 5 análises químicas realizar no mesmo corpo de prova para cada frequência utilizada.
- 3- Comparação da composição química do arame utilizado com os resultados do *weld pad*, de maneira, a avaliar a perda de elementos químicos para a escória ou a adição de elementos devido ao fluxo utilizado.

5.1.1 ER308L

Tabela 5.1 – Composição química dos weld pads com ER308L para frequência

20Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,02515	0,94930	0,00371	0,01779	2,07732	8,45667	19,14017	0,28725
2	0,02597	0,93577	0,00396	0,01836	2,06940	8,53615	19,23464	0,28752
3	0,02756	0,89279	0,00573	0,02323	2,01650	8,73805	19,24262	0,28355
4	0,02584	0,81879	0,00775	0,02791	1,96281	8,99902	19,51559	0,27554
5	0,02627	0,89132	0,00544	0,02147	2,00318	8,73982	19,34576	0,28606
Média	0,02616	0,89759	0,00532	0,02175	2,02584	8,69394	19,29576	0,28398
Variação	0,00241	0,13051	0,00404	0,01012	0,11451	0,54235	0,37542	0,01198
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,03959	0,14839	0,02229	0,00412	0,00465	0,01439	0,00539	68,80382
2	0,03956	0,15027	0,02167	0,00408	0,00473	0,01488	0,00539	68,64763
3	0,03673	0,15140	0,02048	0,00380	0,00450	0,01713	0,00386	68,53207
4	0,03438	0,15916	0,02103	0,00366	0,00465	0,01119	0,00339	68,12930
5	0,03756	0,15315	0,02130	0,00388	0,00473	0,01671	0,00472	68,43863
Média	0,03756	0,15247	0,02135	0,00391	0,00465	0,01486	0,00455	68,51029
Variação	0,00521	0,01077	0,00181	0,00046	0,00023	0,00594	0,002	0,67452

Tabela 5.2 – Composição química dos weld pads com ER308L para frequência 70Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,02484	0,85920	0,00460	0,02044	2,03464	8,62159	19,34811	0,28680
2	0,02612	0,90461	0,00392	0,01870	2,06376	8,54249	19,26094	0,28785
3	0,02729	0,88826	0,00456	0,02066	2,05860	8,65082	19,43488	0,28686
4	0,02513	0,88049	0,00477	0,01951	2,02477	8,64868	19,44084	0,28942
5	0,02529	0,91991	0,00279	0,01563	2,08545	8,45617	19,19711	0,29164
Média	0,02573	0,89049	0,00413	0,01899	2,05344	8,58395	19,33638	0,28851
Variação	0,00245	0,06071	0,00198	0,00503	0,06068	0,19465	0,24373	0,00484
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,03822	0,15134	0,02097	0,00385	0,00452	0,01150	0,00484	68,56454
2	0,03895	0,14938	0,02091	0,00412	0,00455	0,01231	0,00534	68,65605
3	0,03800	0,15395	0,02054	0,00398	0,00463	0,01191	0,00521	68,38987
4	0,03857	0,15258	0,02134	0,00395	0,00477	0,01264	0,00536	68,42718
5	0,04006	0,14738	0,02130	0,00412	0,00455	0,01298	0,00586	68,76976
Média	0,03876	0,15093	0,02101	0,00400	0,00460	0,01227	0,00532	68,56148
Variação	0,00206	0,00657	0,0008	0,00027	0,00025	0,00148	0,00102	0,37989

Tabela 5.3 – Composição química dos weld pads com ER308L para frequência

100Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,02629	0,89708	0,00455	0,01942	2,00448	8,75292	19,47375	0,28439
2	0,02548	0,88968	0,00554	0,02084	1,94323	8,83557	19,55371	0,28348
3	0,02766	0,85989	0,00616	0,02376	1,96898	8,96064	19,63002	0,27861
4	0,02502	0,89559	0,00189	0,01378	2,09844	8,47678	19,27709	0,28953
5	0,02469	0,90384	0,00274	0,01443	2,04052	8,55056	19,38480	0,28764
Média	0,02583	0,88922	0,00418	0,01845	2,01113	8,71529	19,46387	0,28473
Variação	0,00297	0,04395	0,00427	0,00998	0,15521	0,48386	0,35293	0,01092
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,03664	0,15266	0,02040	0,00377	0,00466	0,01101	0,00430	68,30368
2	0,03634	0,15521	0,02036	0,00364	0,00473	0,01089	0,00446	68,20686
3	0,03456	0,15868	0,02030	0,00359	0,00472	0,01000	0,00392	68,00850
4	0,03927	0,14657	0,01966	0,00392	0,00445	0,01210	0,00493	68,69097
5	0,03823	0,14779	0,02037	0,00386	0,00455	0,01161	0,00500	68,55938
Média	0,03701	0,15218	0,02022	0,00376	0,00462	0,01112	0,00452	68,35388
Variação	0,00471	0,01211	0,00071	0,00033	0,00028	0,00072	0,00108	0,68247

Tabela 5.4 – Comparação dos resultados médios nas três frequências para o arame ER308L

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Nb
20Hz	0,02616	0,89759	0,00532	0,02175	2,02584	8,69394	19,29576	0,28398	0,15247	0,00455
70Hz	0,02573	0,89049	0,00413	0,01899	2,05344	8,58395	19,33638	0,28851	0,15093	0,00532
100Hz	0,02583	0,88922	0,00418	0,01845	2,01113	8,71529	19,46387	0,28473	0,15218	0,00452

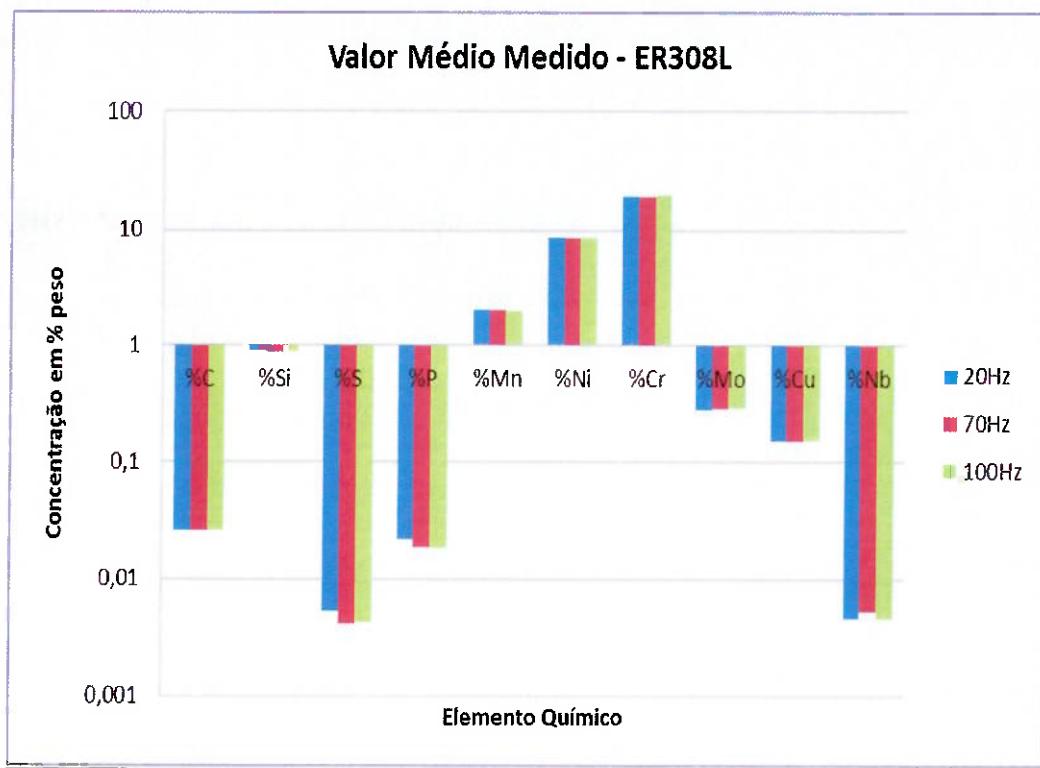


Figura 5.1 Comparação dos resultados médios para o arame ER308L

Tabela 5.5 – Comparação das variações para cada elementos químico entre as cinco análises realizadas nas três frequências para o arame ER308L

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Nb
20Hz	0,00241	0,13051	0,00404	0,01012	0,11451	0,54235	0,37542	0,01198	0,01077	0,002
70Hz	0,00245	0,06071	0,00198	0,00503	0,06068	0,19465	0,24373	0,00484	0,00657	0,00102
100Hz	0,00297	0,04395	0,00427	0,00998	0,15521	0,48386	0,35293	0,01092	0,01211	0,00108

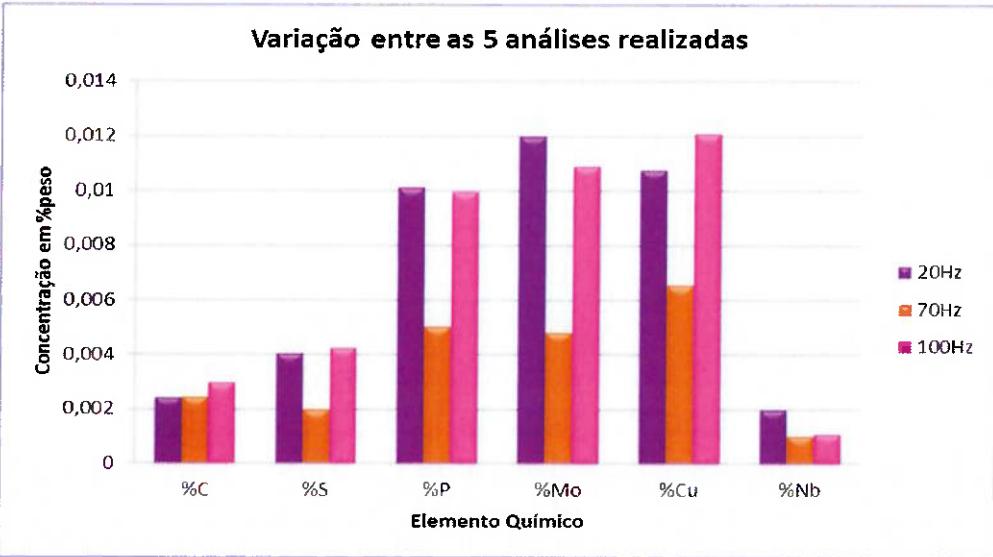
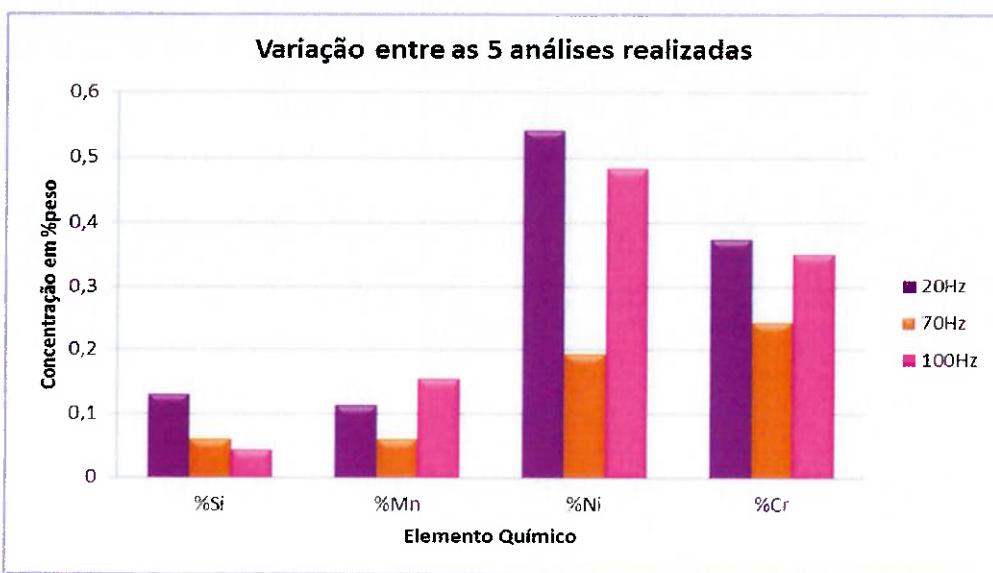


Figura 5.2 Comparação das variações entre as 5 análises para cada frequência.

Abaixo segue os gráficos, a qual se faz uma comparação com a composição química do arame com a obtiva em cada metal de solda.

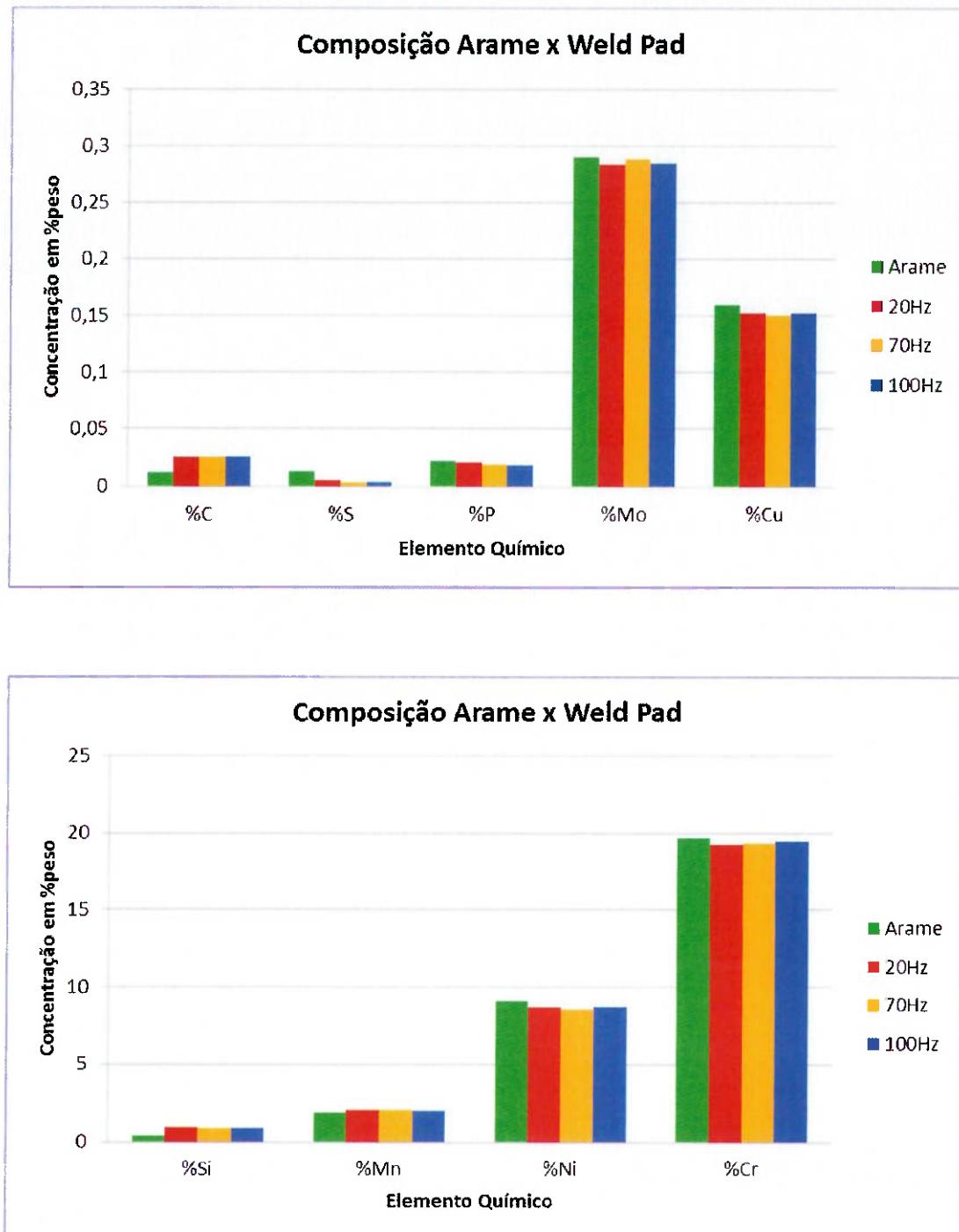


Figura 5.3 Comparação dos resultados médio nas 3 frequências utilizadas com a composição do arame ER308L soldado.

5.1.2 ER309L

Tabela 5.6 – Composição química dos weld pads com ER309L para frequência

20Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,02257	0,79926	0,00163	0,00912	1,95427	12,28542	22,66652	0,10746
2	0,02560	0,79515	0,00118	0,00882	1,96889	12,23561	22,59797	0,10741
3	0,02256	0,74914	0,00381	0,01292	1,89425	12,58412	22,94072	0,10625
4	0,02441	0,77559	0,00394	0,01318	1,89514	12,60911	22,94768	0,10615
5	0,02179	0,79991	0,00134	0,00846	1,95513	12,30765	22,72664	0,10797
Média	0,02339	0,78381	0,00238	0,01050	1,93354	12,40438	22,77591	0,10705
Variação	0,00381	0,05077	0,00276	0,00472	0,07464	0,3735	0,34971	0,00182
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,04083	0,03721	0,01545	0,00445	0,00287	0,01590	0,00688	62,03015
2	0,04090	0,03691	0,01549	0,00450	0,00291	0,01678	0,00711	62,13478
3	0,03834	0,03748	0,01517	0,00419	0,00303	0,01500	0,00622	61,56681
4	0,03835	0,03725	0,01523	0,00439	0,00302	0,01567	0,00634	61,50456
5	0,04102	0,03704	0,01563	0,00445	0,00295	0,01662	0,00728	61,94613
Média	0,03989	0,03718	0,01539	0,00440	0,00296	0,01599	0,00677	61,83649
Variação	0,00268	0,00057	0,00046	0,00031	0,00016	0,00178	0,00106	0,63022

Tabela 5.7 – Composição química dos weld pads com ER309L para frequência 70Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,02092	0,71609	0,00487	0,01659	1,85184	12,61819	22,87613	0,10483
2	0,02003	0,77100	0,00306	0,01338	1,91917	12,30728	22,67943	0,10583
3	0,02512	0,79534	0,00221	0,01114	1,93649	12,24226	22,65233	0,10738
4	0,02519	0,73028	0,00561	0,01772	1,84616	12,73427	23,01938	0,10468
5	0,02357	0,69826	0,00661	0,02006	1,80900	12,90065	23,15063	0,10384
Média	0,02297	0,74219	0,00447	0,01578	1,87253	12,56053	22,87558	0,10531
Variação	0,00516	0,09708	0,0044	0,00892	0,12749	0,65839	0,4983	0,00354
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,03731	0,03781	0,01518	0,00402	0,00295	0,01469	0,00561	61,67297
2	0,03924	0,03781	0,01483	0,00417	0,00288	0,01383	0,00604	62,06204
3	0,04042	0,03740	0,01530	0,00436	0,00290	0,01802	0,00681	62,10250
4	0,03641	0,03867	0,01516	0,00403	0,00303	0,01190	0,00559	61,40192
5	0,03522	0,03907	0,01535	0,00391	0,00312	0,01146	0,00513	61,17412
Média	0,03772	0,03815	0,01516	0,00410	0,00298	0,01398	0,00584	61,68271
Variação	0,0052	0,00167	0,00052	0,00045	0,00024	0,00656	0,00168	0,92838

Tabela 5.8 – Composição química dos weld pads com ER309L para frequência 100Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,02330	0,70155	0,00672	0,01966	1,79458	12,99155	23,05554	0,10492
2	0,02616	0,94405	0,00502	0,00441	2,00935	12,13091	22,13886	0,11058
3	0,02269	0,75090	0,00409	0,01489	1,86308	12,67912	22,88186	0,10582
4	0,02787	0,92642	0,00524	0,00356	2,03944	12,08599	22,21154	0,11165
5	0,02312	0,69027	0,00762	0,02141	1,78306	13,02549	23,14576	0,10436
Média	0,02463	0,80264	0,00574	0,01279	1,89790	12,58261	22,68671	0,10747
Variação	0,00518	0,25378	0,00353	0,01785	0,25638	0,9395	1,0069	0,00729
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,03579	0,03755	0,01567	0,00387	0,00305	0,01074	0,00488	61,19062
2	0,04527	0,03646	0,01829	0,00505	0,00301	0,02324	0,00955	62,48979
3	0,03803	0,03716	0,01513	0,00407	0,00296	0,01242	0,00554	61,56223
4	0,04572	0,03973	0,02116	0,00524	0,00353	0,01951	0,01134	62,44206
5	0,03492	0,04144	0,01698	0,00386	0,00333	0,00973	0,00493	61,08372
Média	0,03995	0,03847	0,01745	0,00442	0,00318	0,01513	0,00725	61,75368
Variação	0,0108	0,00498	0,00603	0,00138	0,00057	0,01351	0,00646	1,40607

Tabela 5.9 – Comparação dos resultados médios nas três frequências para o arame ER309L .

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Nb
20Hz	0,02339	0,78381	0,00238	0,01050	1,93354	12,40438	22,77591	0,10705	0,03718	0,00677
70Hz	0,02297	0,74219	0,00447	0,01578	1,87253	12,56053	22,87558	0,10531	0,03815	0,00584
100Hz	0,02463	0,80264	0,00574	0,01279	1,89790	12,58261	22,68671	0,10747	0,03847	0,00725

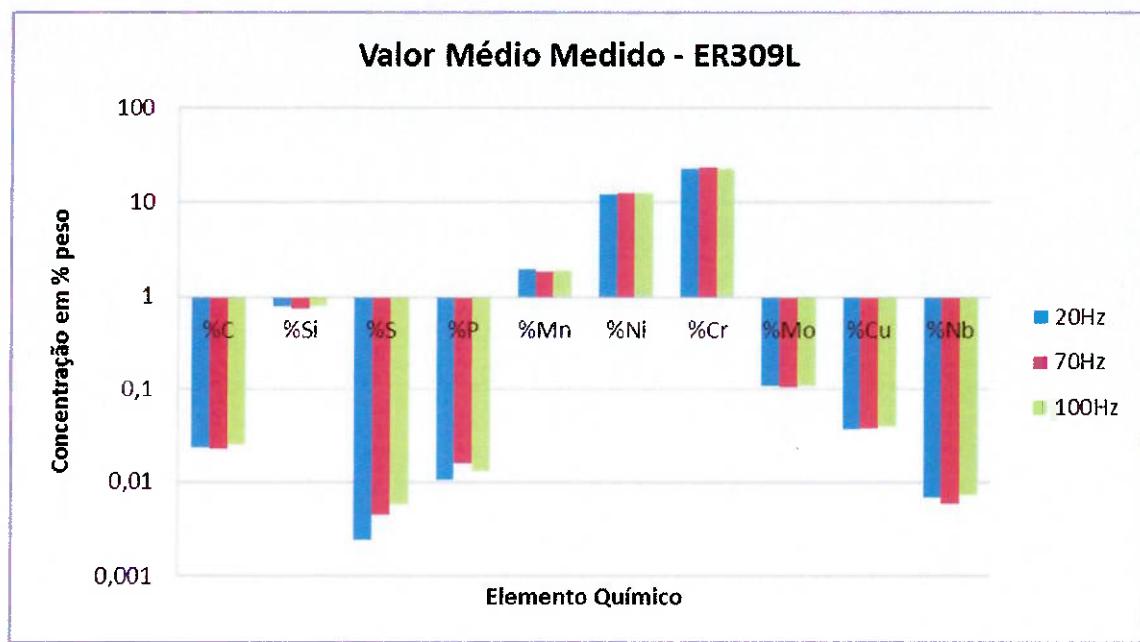


Figura 5.4 Comparação dos resultados médios para o arame ER309L

Tabela 5.10 – Comparação das variações para cada elementos químico entre as cinco análises realizadas nas três frequências para o arame ER309L

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Nb
20Hz	0,00381	0,05077	0,00276	0,00472	0,07464	0,3735	0,34971	0,00182	0,00057	0,00106
70Hz	0,00516	0,09708	0,0044	0,00892	0,12749	0,65839	0,4983	0,00354	0,00167	0,00168
100Hz	0,00518	0,25378	0,00353	0,01785	0,25638	0,9395	1,0069	0,00729	0,00498	0,00646

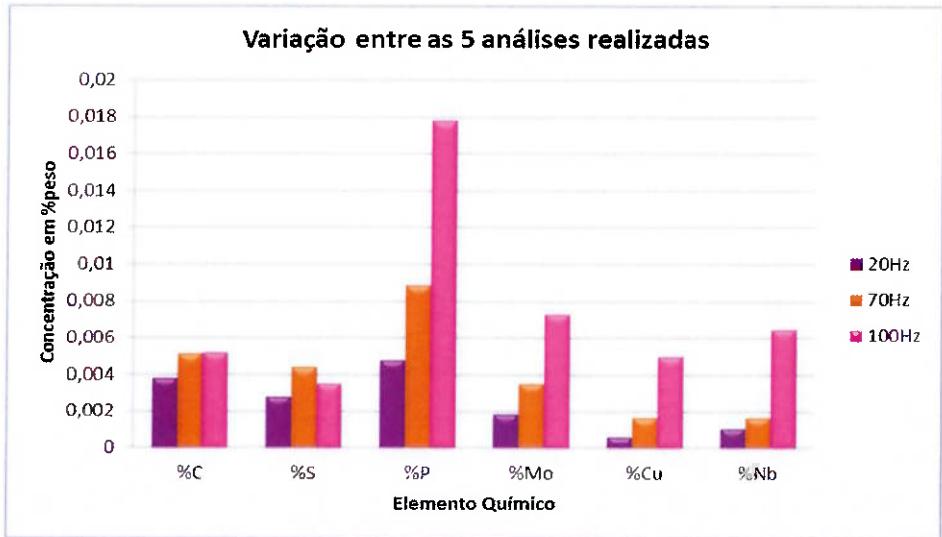
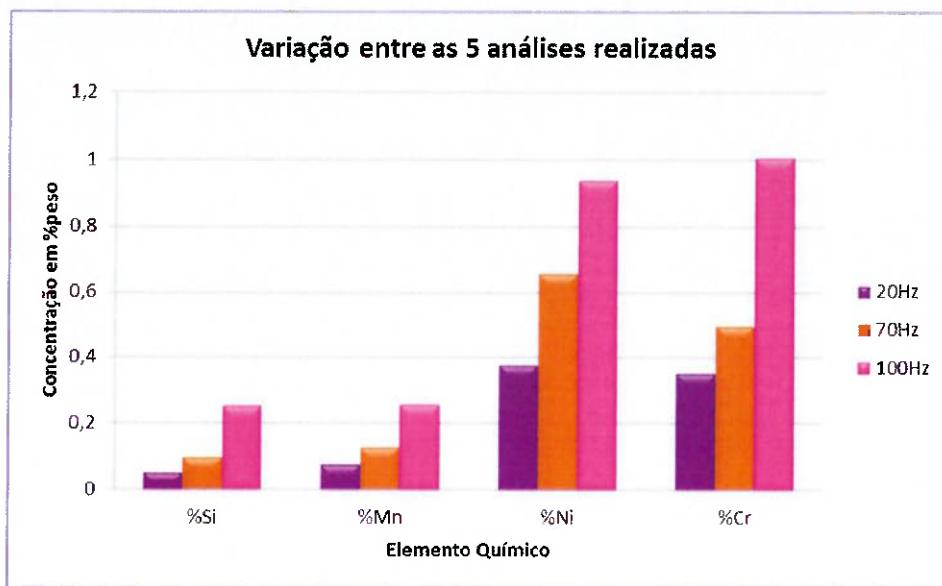


Figura 5.5 Comparação das variações entre 5 análises para cada frequência

Abaixo segue os gráficos, a qual se faz uma comparação com a composição química do arame com a obtiva em cada metal de solda.

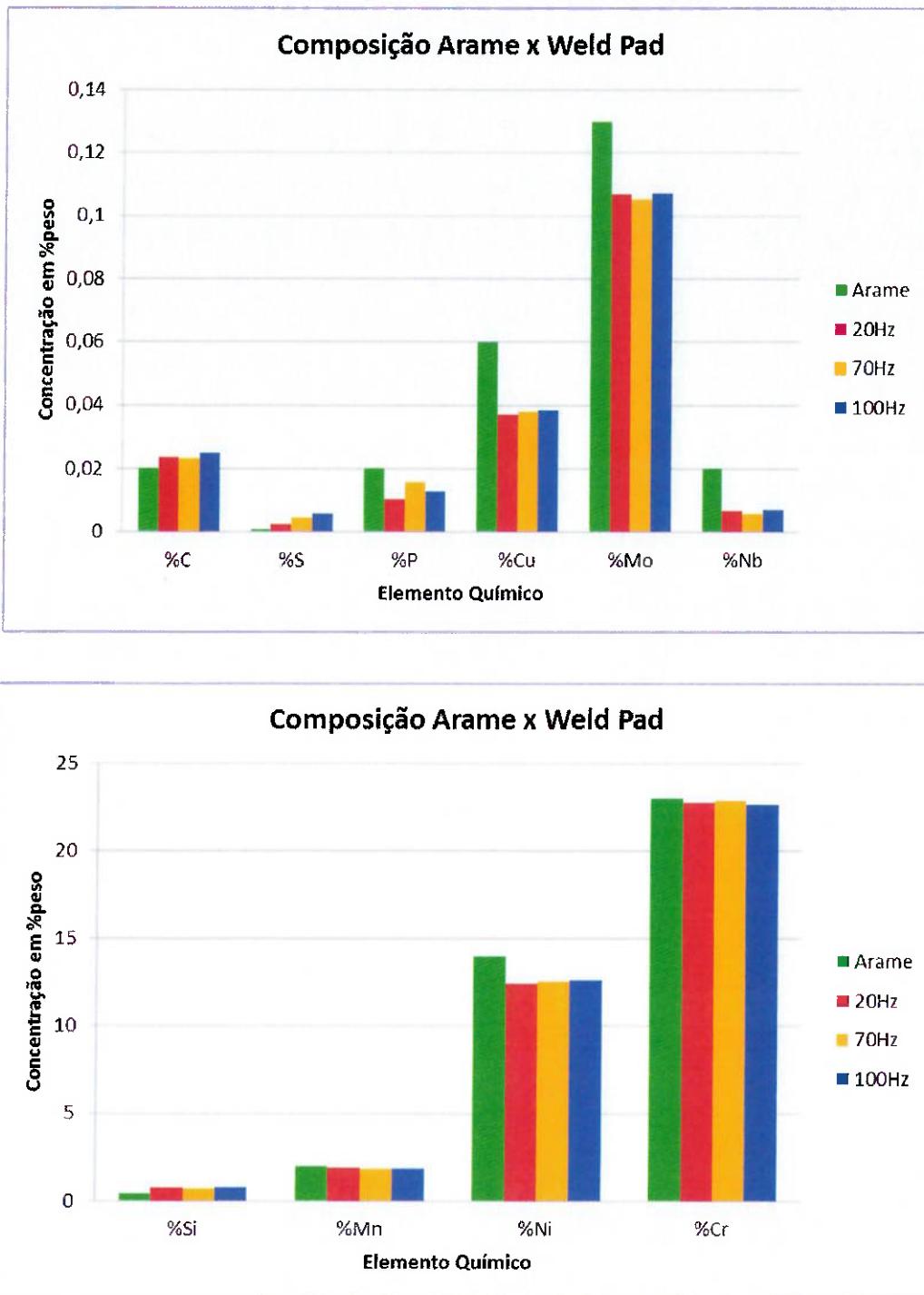


Figura 5.6 Comparação dos resultados médio nas 3 frequências utilizadas com a composição do arame ER309L soldado.

5.1.3 ER2209

Tabela 5.11 – Composição química dos weld pads com ER2209 para frequência 20Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,01379	0,57212	0,00189	0,01381	1,26195	8,20041	22,75238	3,03164
2	0,01355	0,57190	0,00115	0,01396	1,24953	8,22017	22,74427	3,02374
3	0,01437	0,56923	0,00129	0,01485	1,24711	8,28013	22,87395	2,97402
4	0,01901	0,73382	0,00102	0,01464	1,33468	7,54518	21,86323	3,37463
5	0,01282	0,57794	0,00134	0,01410	1,21282	8,23105	22,89024	2,99900
Média	0,01471	0,60500	0,00134	0,01427	1,26122	8,09539	22,62481	3,08061
Variação	0,00619	0,16459	0,00087	0,00104	0,12186	0,73495	1,02701	0,40061
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,06280	0,14074	0,02632	0,00196	0,00480	0,02681	0,00759	63,88099
2	0,06244	0,14038	0,02635	0,00196	0,00482	0,02662	0,00742	63,89174
3	0,06251	0,14486	0,02727	0,00200	0,00503	0,02619	0,00791	63,74928
4	0,07617	0,12904	0,03482	0,00342	0,00526	0,05052	0,01482	64,79974
5	0,06250	0,14444	0,02655	0,00203	0,00501	0,02732	0,00766	63,78518
Média	0,06528	0,13989	0,02826	0,00227	0,00498	0,03149	0,00908	64,02139
Variação	0,01366	0,01582	0,0085	0,00146	0,00046	0,02433	0,0074	1,05046

Tabela 5.12 – Composição química dos weld pads com ER2209 para frequência 70Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,01376	0,55864	0,00104	0,01705	1,25728	8,21155	22,48291	2,90733
2	0,01366	0,54975	0,00091	0,01596	1,24054	8,28668	22,58360	2,92874
3	0,01362	0,55606	0,00120	0,01459	1,25610	8,22574	22,57773	2,94995
4	0,01417	0,52331	0,00168	0,01873	1,22289	8,43618	22,76921	2,84807
5	0,01390	0,53851	0,00112	0,01723	1,24569	8,34495	22,55184	2,89739
Média	0,01382	0,54525	0,00119	0,01671	1,24450	8,30102	22,59306	2,90630
Variação	0,00055	0,03533	0,00077	0,00414	0,03439	0,22463	0,2863	0,10188
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,06256	0,14139	0,02773	0,00212	0,00489	0,02931	0,00703	64,27541
2	0,06169	0,14098	0,02705	0,00207	0,00488	0,02699	0,00665	64,10985
3	0,06267	0,14056	0,02712	0,00207	0,00492	0,02781	0,00718	64,13268
4	0,05902	0,14650	0,02726	0,00203	0,00498	0,02436	0,00637	63,89525
5	0,06059	0,14257	0,02756	0,00213	0,00487	0,02644	0,00683	64,11838
Média	0,06131	0,14240	0,02734	0,00208	0,00491	0,02698	0,00681	64,10631
Variação	0,00365	0,00594	0,00068	0,0001	0,00011	0,00495	0,00081	0,38016

Tabela 5.13 – Composição química dos weld pads com ER2209 para frequência 100hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,01637	0,56354	0,00193	0,02035	1,18838	8,40036	22,76982	2,89834
2	0,01482	0,55369	0,00154	0,01877	1,21209	8,41911	22,89938	2,90622
3	0,01730	0,55649	0,00125	0,01873	1,19570	8,41629	22,85629	2,91476
4	0,02099	0,56356	0,00170	0,01954	1,19418	8,39357	22,80925	2,94083
5	0,02069	0,55898	0,00134	0,01842	1,20053	8,44118	22,84856	2,92631
Média	0,01803	0,55925	0,00155	0,01916	1,19818	8,41410	22,83666	2,91729
Variação	0,00617	0,00987	0,00068	0,00193	0,02371	0,04761	0,12956	0,04249
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,06017	0,14564	0,02759	0,00199	0,00499	0,02589	0,00612	63,86854
2	0,06045	0,14707	0,02777	0,00195	0,00508	0,02430	0,00677	63,70098
3	0,06009	0,14652	0,02748	0,00202	0,00567	0,02534	0,00664	63,74943
4	0,06040	0,14525	0,02751	0,00207	0,00503	0,02775	0,00659	63,78180
5	0,05938	0,14451	0,02670	0,00206	0,00501	0,02564	0,00611	63,71457
Média	0,06010	0,14580	0,02741	0,00202	0,00516	0,02578	0,00645	63,76306
Variação	0,00107	0,00256	0,00107	0,00012	0,00068	0,00345	0,00066	0,16756

Tabela 5.14 – Comparação dos resultados médios nas três frequências para o arame ER2209 .

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Nb
20Hz	0,01471	0,60500	0,00134	0,01427	1,26122	8,09539	22,62481	3,08061	0,13989	0,00908
70Hz	0,01382	0,54525	0,00119	0,01671	1,24450	8,30102	22,59306	2,90630	0,14240	0,00681
100Hz	0,01803	0,55925	0,00155	0,01916	1,19818	8,41410	22,83666	2,91729	0,14580	0,00645

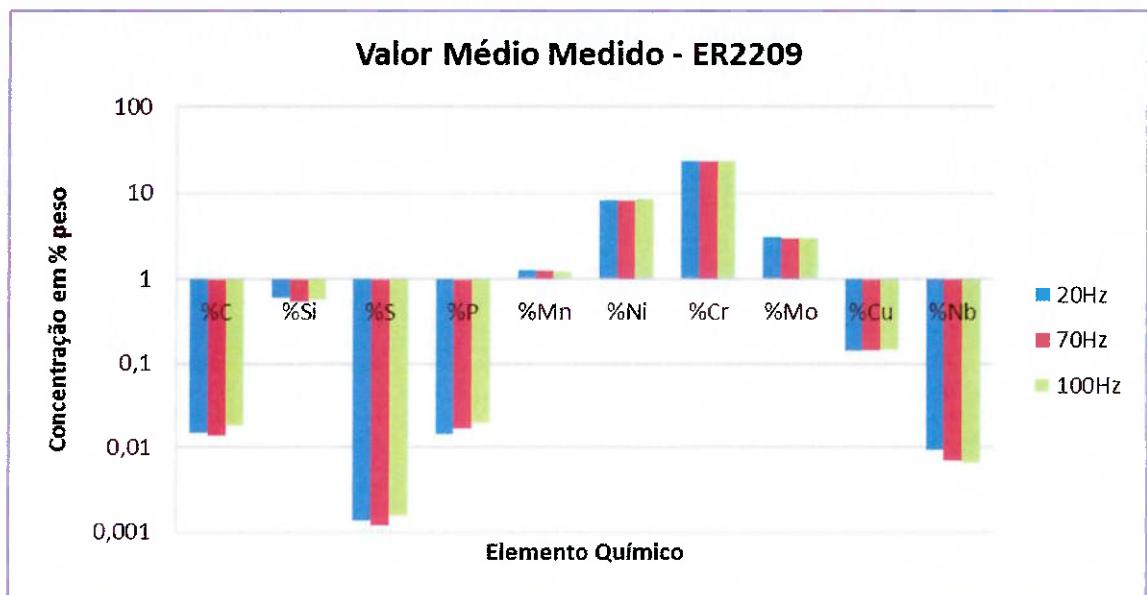


Figura 5.7 Comparação dos resultados médios para o arame ER2209

Tabela 5.15 – Comparação das variações para cada elementos químico entre as cinco análises realizadas nas três frequências para o arame ER2209

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Nb
20Hz	0,00619	0,16459	0,00087	0,00104	0,12186	0,73495	1,02701	0,40061	0,01582	0,0074
70Hz	0,00055	0,03533	0,00077	0,00414	0,03439	0,22463	0,2863	0,10188	0,00594	0,0081
100Hz	0,00617	0,00987	0,00068	0,00193	0,02371	0,04761	0,12956	0,04249	0,00256	0,0066

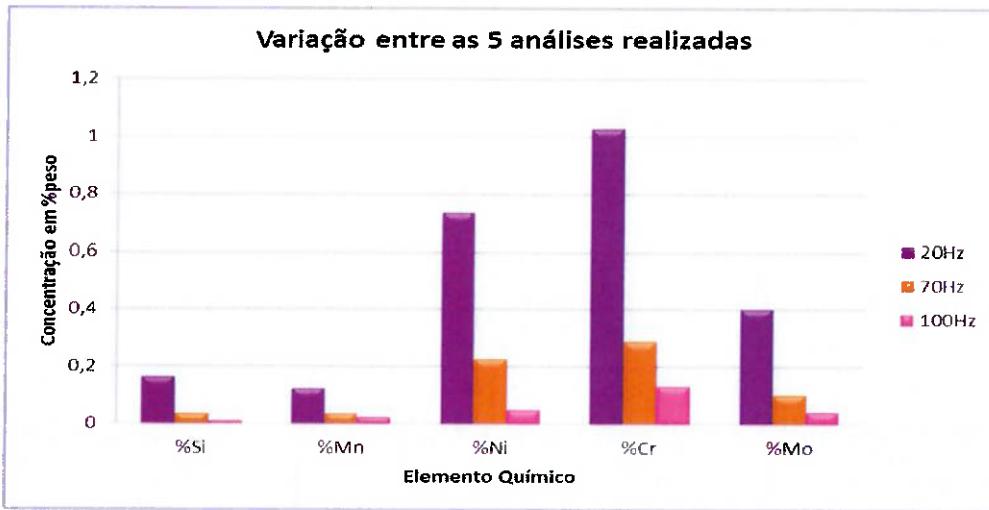
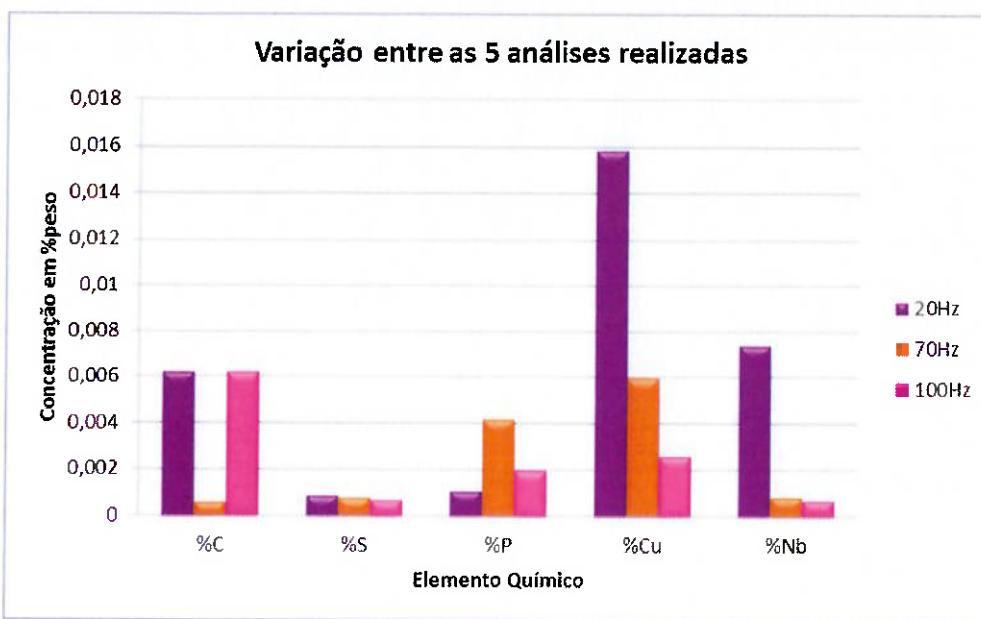
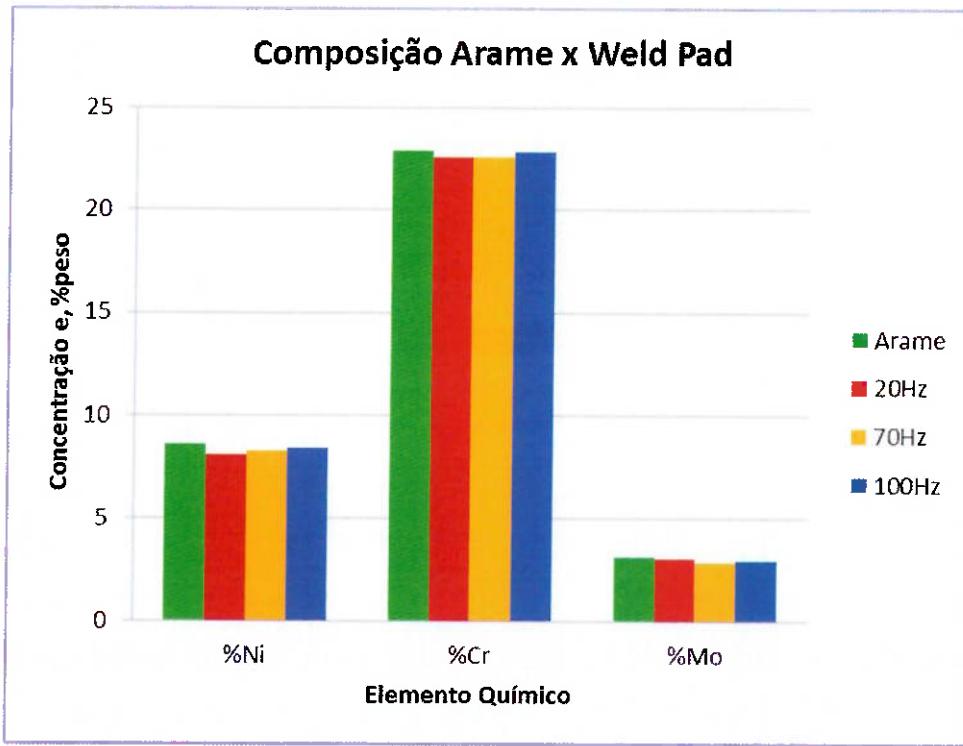
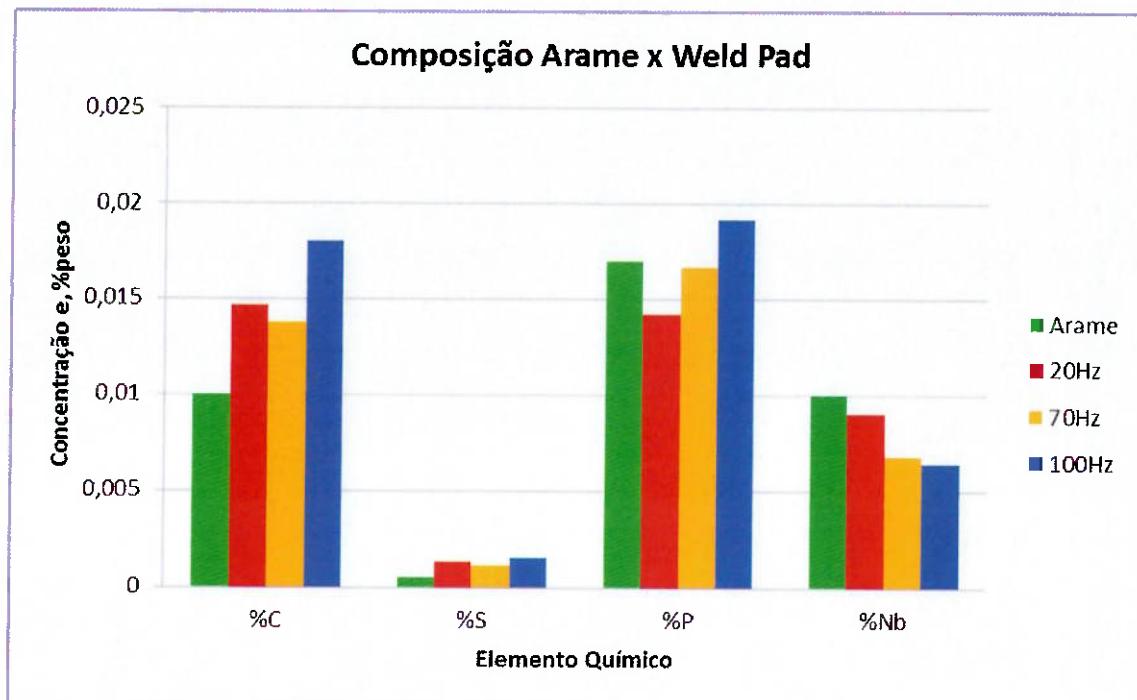


Figura 5.8 Comparação das variações entre 5 análises para cada frequência

Abaixo segue os gráficos, a qual se faz uma comparação com a composição química do arame com a obtiva em cada metal de solda.



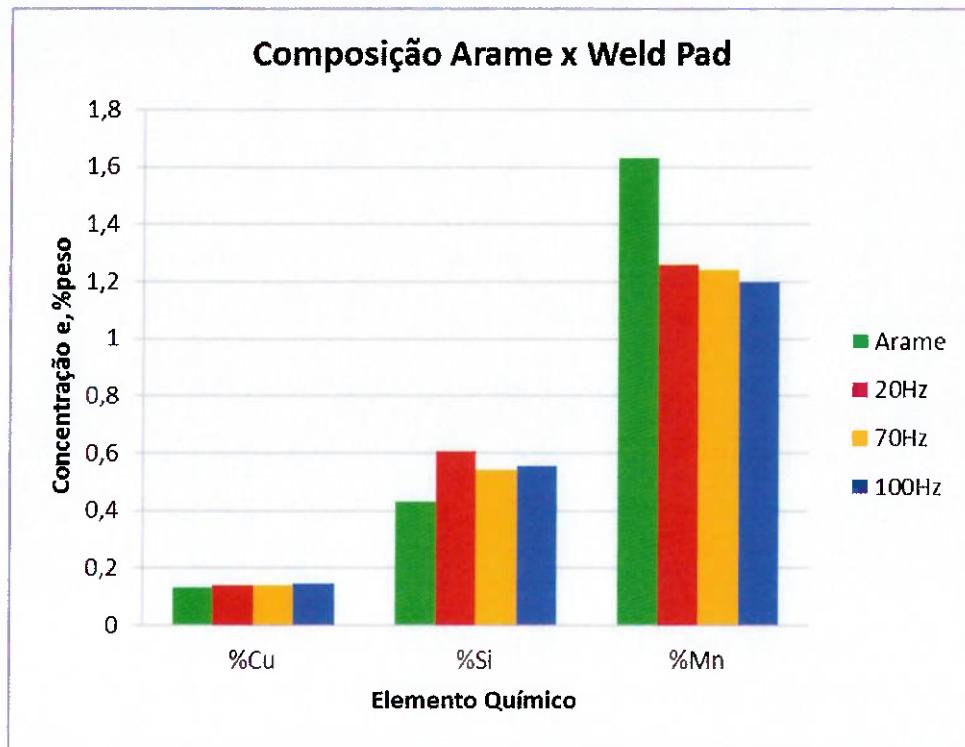


Figura 5.9 Comparação dos resultados médio nas 3 frequências utilizadas com a composição do arame ER2209 soldado.

5.1.4 ER2594

Tabela 5.16 – Composição química dos weld pads com ER2594 para frequência 20Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,01752	0,50790	0,00083	0,01892	0,25525	9,18047	24,81424	3,77727
2	0,01720	0,50149	0,00091	0,01931	0,25895	9,16033	24,81992	3,76046
3	0,01801	0,50953	0,00089	0,01892	0,25743	9,16415	24,81952	3,75816
4	0,01722	0,49840	0,00146	0,02038	0,25588	9,25131	24,91425	3,73321
5	0,01728	0,50329	0,00101	0,01940	0,25482	9,17649	24,81792	3,75378
Média	0,01745	0,50412	0,00102	0,01939	0,25647	9,18655	24,83717	3,75658
Variação	0,00081	0,01113	0,00063	0,00146	0,00413	0,09098	0,10001	0,04406
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,04416	0,10749	0,02968	0,00179	0,00386	0,02556	0,00716	61,20788
2	0,04409	0,10804	0,02963	0,00179	0,00383	0,02635	0,00746	61,24022
3	0,04404	0,10706	0,02950	0,00180	0,00386	0,02628	0,00741	61,23344
4	0,04346	0,10921	0,03023	0,00181	0,00395	0,02521	0,00734	61,08669
5	0,04425	0,10903	0,03073	0,00180	0,00382	0,02674	0,00751	61,23213
Média	0,04400	0,10817	0,02995	0,00180	0,00386	0,02603	0,00738	61,20007
Variação	0,00079	0,00215	0,00123	0,00002	0,00013	0,00153	0,00035	0,15353

Tabela 5.17 – Composição química dos weld pads com ER2594 para frequência 70Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,01691	0,49554	0,00166	0,02122	0,25814	9,25532	24,92828	3,71441
2	0,01617	0,49185	0,00146	0,02099	0,25045	9,21345	24,91458	3,74438
3	0,01568	0,52016	0,00152	0,01732	0,25602	9,34803	24,40962	3,79810
4	0,01534	0,51542	0,00125	0,01939	0,26173	9,09018	24,73169	3,78622
5	0,01864	0,51296	0,00112	0,02194	0,26097	9,16185	24,79524	3,71831
Média	0,01655	0,50719	0,00140	0,02017	0,25746	9,21377	24,75588	3,75228
Variação	0,0033	0,02831	0,00054	0,00462	0,01128	0,25785	0,51866	0,08369
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,04355	0,10873	0,02997	0,00184	0,00399	0,02517	0,00707	61,08820
2	0,04364	0,10821	0,03005	0,00180	0,00390	0,02384	0,00734	61,12788
3	0,04710	0,10935	0,02895	0,00181	0,00341	0,02376	0,00769	61,41148
4	0,04587	0,10754	0,03064	0,00179	0,00338	0,02486	0,00772	61,35698
5	0,04549	0,11067	0,03098	0,00187	0,00305	0,02349	0,00752	61,28590
Média	0,04513	0,10890	0,03012	0,00182	0,00355	0,02422	0,00747	61,25409
Variação	0,00355	0,00313	0,00203	0,00008	0,00094	0,00168	0,00038	0,32328

Tabela 5.18 – Composição química dos weld pads com ER2594 para frequência 100Hz

Elemento	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
1	0,01538	0,54277	0,00102	0,01291	0,27268	8,72466	24,40522	3,95123
2	0,01307	0,53623	0,00155	0,01372	0,27231	8,75794	24,42090	3,91198
3	0,01826	0,48810	0,00130	0,01740	0,26511	9,02971	24,77483	3,76717
4	0,01778	0,46591	0,00207	0,02183	0,26881	9,26120	24,96157	3,64089
5	0,01705	0,48816	0,00118	0,01917	0,25990	9,17350	24,80423	3,69133
Média	0,01631	0,50423	0,00142	0,01701	0,26776	8,98940	24,67335	3,79252
Variação	0,00519	0,07686	0,00105	0,00892	0,01278	0,53654	0,55635	0,31034
Elemento	%V	%Cu	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe
1	0,04811	0,10068	0,02838	0,00201	0,00361	0,03134	0,00932	61,85068
2	0,04715	0,10108	0,02788	0,00199	0,00355	0,02942	0,00883	61,85240
3	0,04467	0,10779	0,02902	0,00193	0,00383	0,02712	0,00835	61,41541
4	0,04231	0,11091	0,03020	0,00188	0,00399	0,02391	0,00707	61,13965
5	0,04359	0,11020	0,02940	0,00184	0,00395	0,02522	0,00761	61,32367
Média	0,04517	0,10613	0,02898	0,00193	0,00379	0,02740	0,00824	61,51636
Variação	0,0058	0,01023	0,00232	0,00017	0,00044	0,00743	0,00225	0,71275

Tabela 5.19 – Comparação dos resultados médios nas três frequências para o arame ER2594

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Nb
20Hz	0,01745	0,50412	0,00102	0,01939	0,25647	9,18655	24,83717	3,75658	0,10817	0,00738
70Hz	0,01655	0,50719	0,00140	0,02017	0,25746	9,21377	24,75588	3,75228	0,10890	0,00747
100Hz	0,01631	0,50423	0,00142	0,01701	0,26776	8,98940	24,67335	3,79252	0,10613	0,00824

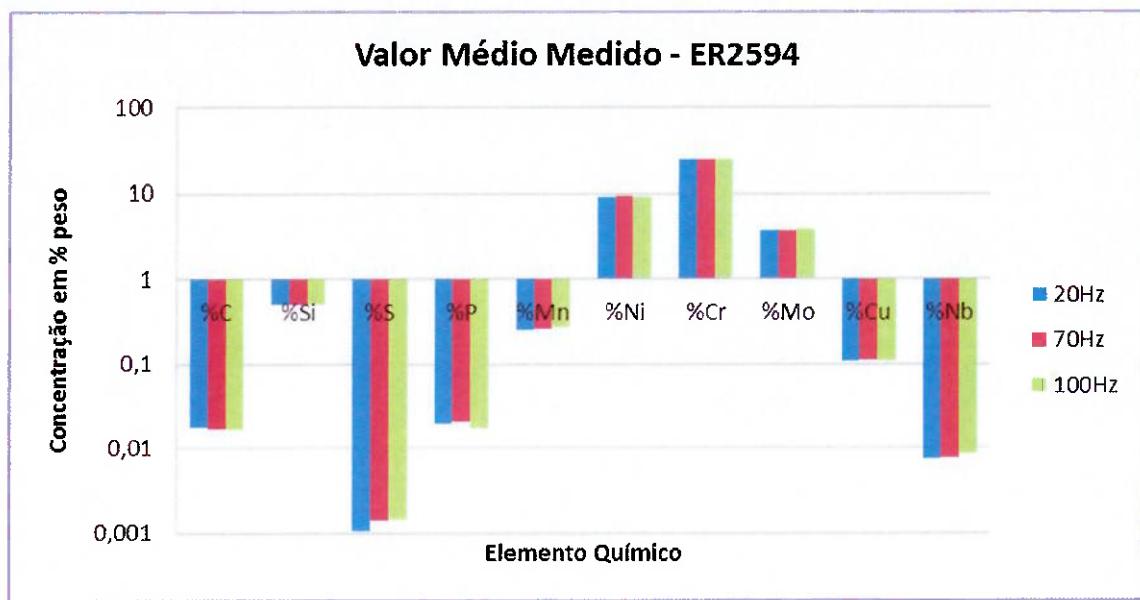


Figura 5.10 Comparação dos resultados médios para o arame ER2594

Tabela 5.20 – Comparação das variações para cada elementos químico entre as cinco análises realizadas nas três frequências para o arame ER2594

Elementos	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Nb
20Hz	0,00081	0,01113	0,00063	0,00146	0,00413	0,09098	0,10001	0,04406	0,00215	0,0035
70Hz	0,0033	0,02831	0,00054	0,00462	0,01128	0,25785	0,51866	0,08369	0,00313	0,00038
100Hz	0,00519	0,07686	0,00105	0,00892	0,01278	0,53654	0,55635	0,31034	0,01023	0,00225

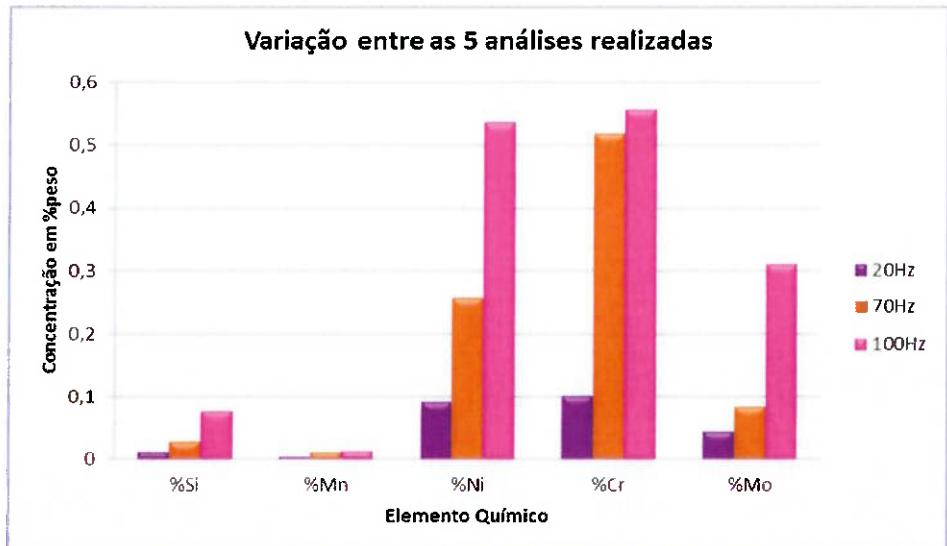
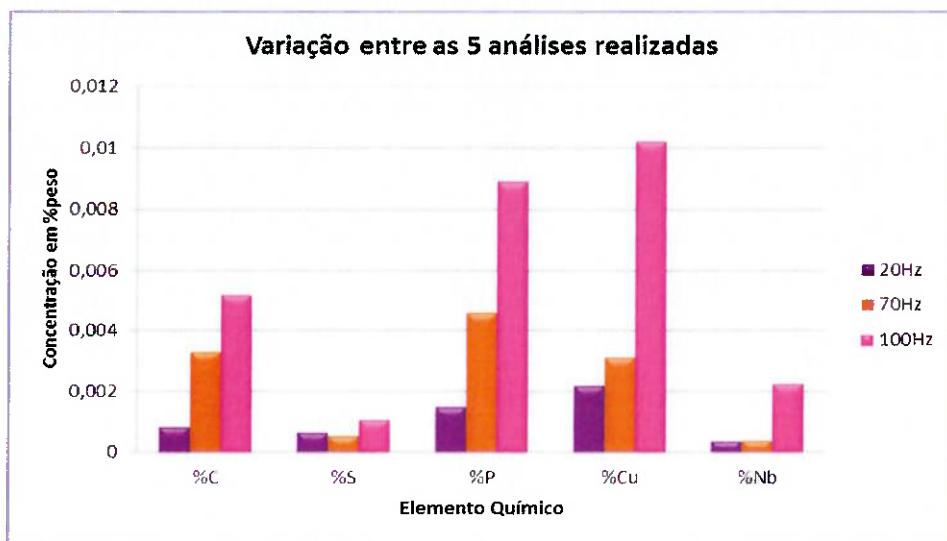
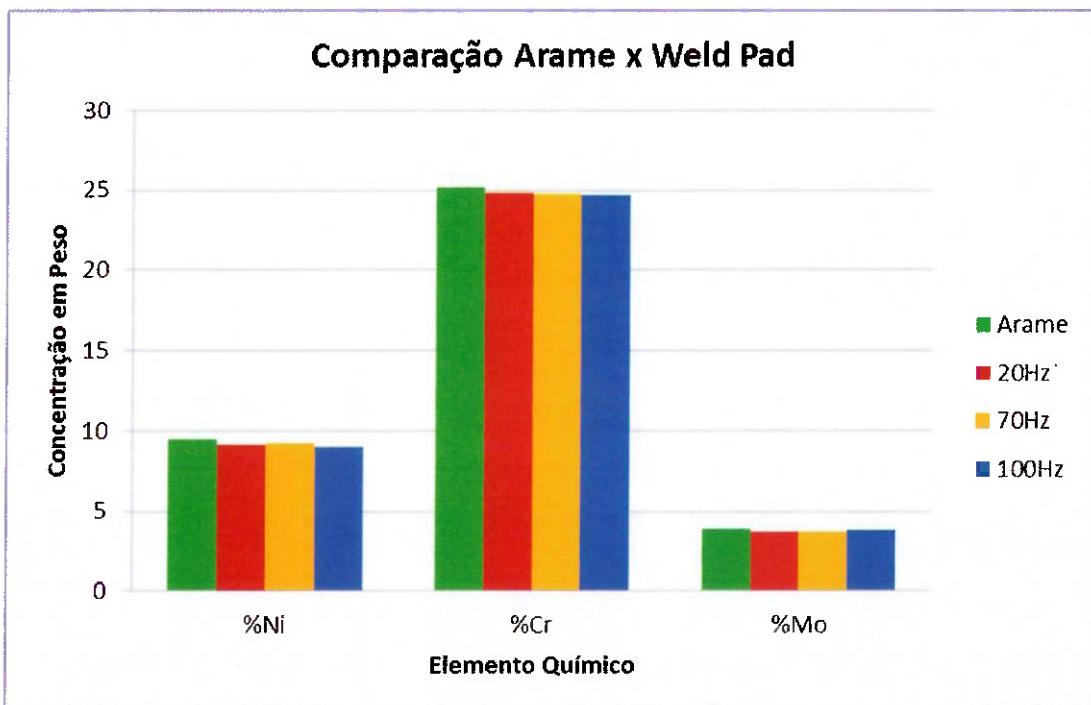
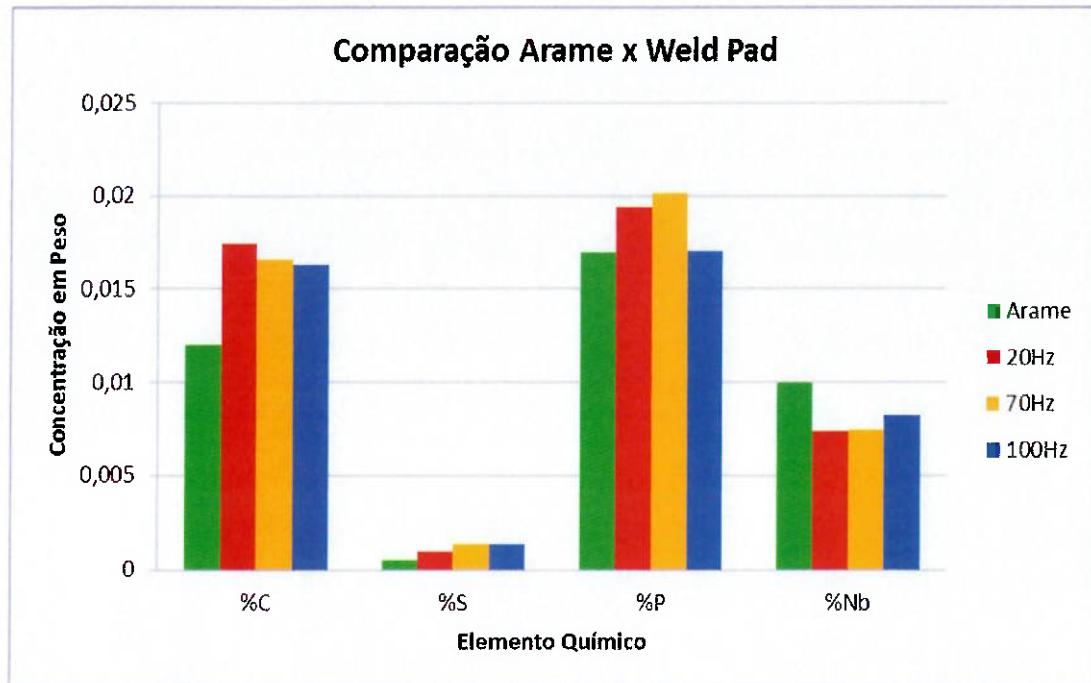


Figura 5.11 Comparação das variações entre 5 análises para cada frequência

Abaixo segue os gráficos, a qual se faz uma comparação com a composição química do arame com a obtiva em cada metal de solda.



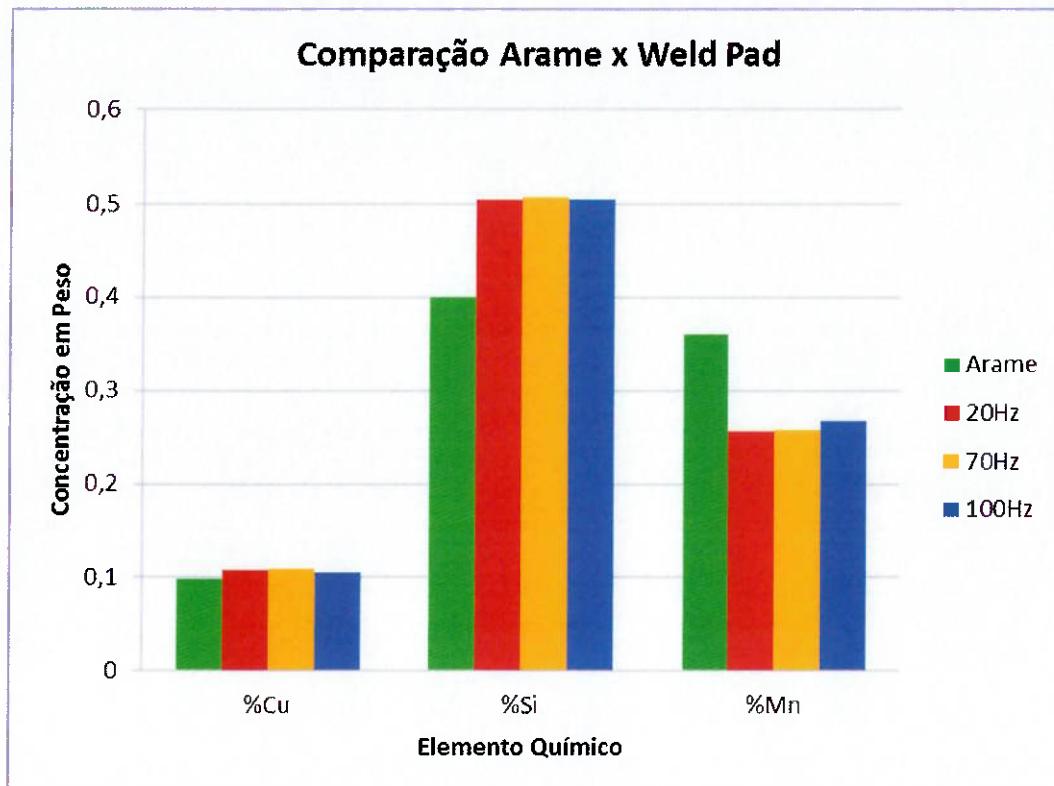


Figura 5.12 Comparação dos resultados médio nas 3 frequências utilizadas com a composição do arame ER2594 soldado

De uma maneira geral os 4 tipos de inoxidáveis avaliados mantiveram um mesmo comportamento. Todos tiveram mínimas variações de composição química conforme a alteração da frequência da onda em relação a composição original do arame. Como essas variações tem um valor muito baixo em alguns casos (menos que 0,1), podem ser somente referente ao desvio padrão do próprio equipamento.

Há perda dos elementos químicos do arame na poça de fusão, elementos de liga como Cr, Ni, Mo, Nb e Mn foram perdidos para a escória. Entretanto elementos com C, S, P e Si houve um pequeno acréscimo, ou seja, material químico presente nos fluxos depositaram no metal de solda. Sendo que se

utilizaram fluxos neutros essa contribuição química foi mínima, caso fosse um fluxo ligado, por exemplo, um com pensante em Cr, seria possível observar claramente a deposição de material do fluxo no metal de solda.

Avaliando especificamente o elemento fósforo pode-se observar pelos gráficos que nos arames ER308L e ER309L este elemento sempre esteve com concentrações nos weld pads abaixo do que se tinha no arame. Ou seja, este elemento foi direcionado a escória, o que pode ter sido devido a uma ação de “limpeza” proporcionada pelo fluxo (presença de componentes químicos com a função de retirar impurezas do metal de solda). O mesmo não se observa nos duplex, mas deve se lembrar de que o fluxo utilizado foi outro.

Observa-se também uma menor variação de composição dos elementos de liga entre as 5 análises feitas para cada frequência nos arames duplex, isso pode ser explicado pela utilização de fluxos diferenciados para cada tipo de aço inoxidável. Uma vez que o fluxo é formulado especificamente para a utilização com uma dada liga, este deve garantir seu melhor desempenho e neste caso tivemos uma menor variação de deposição de material químico no metal de solda.

Uma vez que tem uma variação da frequência, não se aumenta ou diminui o tempo de permanência da onde quadrada na parte positiva ou negativa. Não está se deixando o eletrodo, por exemplo, mais tempo no polo positivo (catodo) para teoricamente ter mais tempo para que ocorra reações de redução nos elementos químicos provenientes do arame. Com um aumento de frequência aumenta-se a alternância dessa polaridade em um mesmo espaço de tempo (segundo) e pelos resultados obtidos demonstra que provavelmente se fosse

possível com o auxílio de um equipamento adequado, mensurar quanto tempo à onda permanece na zona negativa e quanto tempo permanece na positiva, esses seriam iguais ou muito próximos independente da frequência. Por exemplo, supondo que a onda fique 0,5s em cada polaridade ao se aumentar a frequência de 20Hz para 100Hz, continuaríamos tendo 0,5s em cada polaridade no total, só que divididos em intervalos menores.

5.2 Teor de Ferrita

Para todos os weld pads foram feitas cinco análises através de ferritoscópio, sendo descartado o maior e o menor valor, dos três restantes fez a média para análise. E também se calculou o valor teórico pelo diagrama WRC-1992, de maneira que fosse possível uma comparação do valor teórico com o prático.

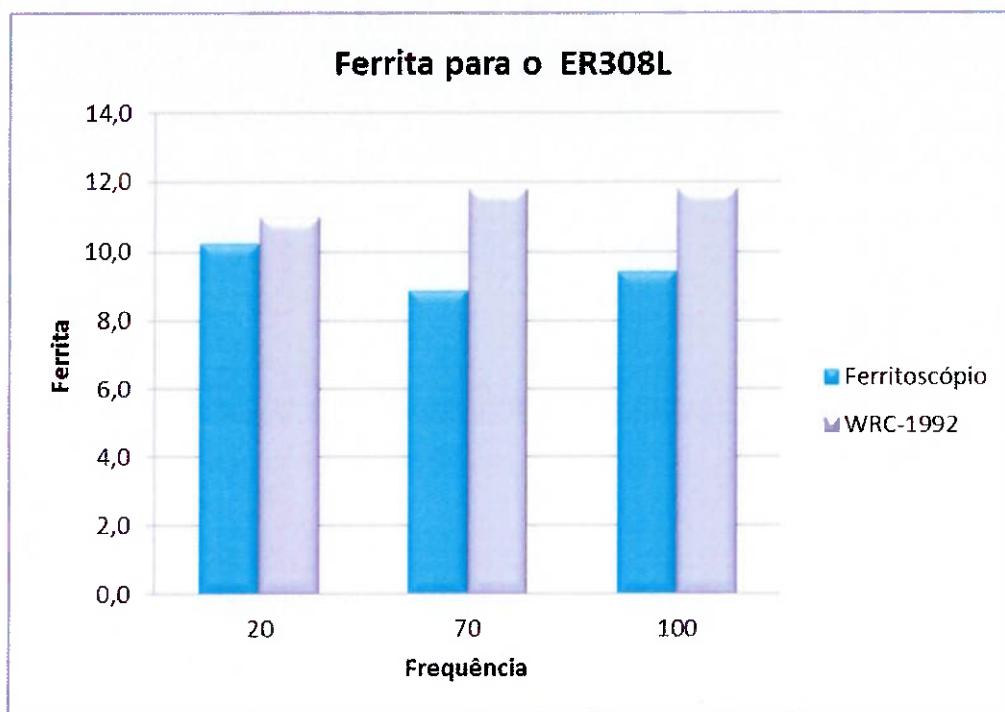
5.2.1 ER308L

Tabela 5.21 – Resultados do teor de ferrita para o ER308L no ferritoscópio

Frequência	Medições com Ferritoscópio					Média
20Hz	9,1	9,9	10,4	10,4	11,8	10,2
70Hz	8,5	8,6	8,7	9,3	9,5	8,9
100Hz	8,7	8,9	9,6	9,8	10,1	9,4

Tabela 5.22 – Resultados do teor de ferrita para o ER308L pelo WRC-1992

Frequência	Cr_{eq}	Ni_{eq}	FN
20Hz	19,58	11,01	11,0
70Hz	19,63	10,90	11,8
100Hz	19,75	11,00	11,8

**Figura 5.13** Comparação do teor de ferrita teórico com o medido para ER308L

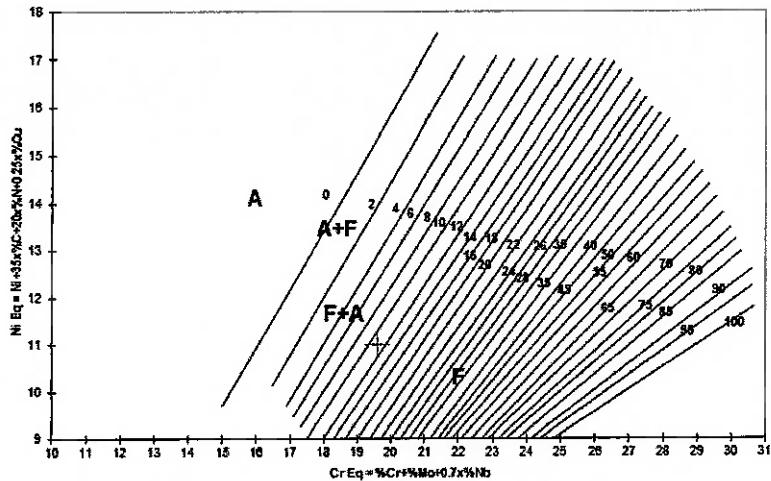


Figura 5.14 Gráfico WRC-1992 para ER308L com 20Hz

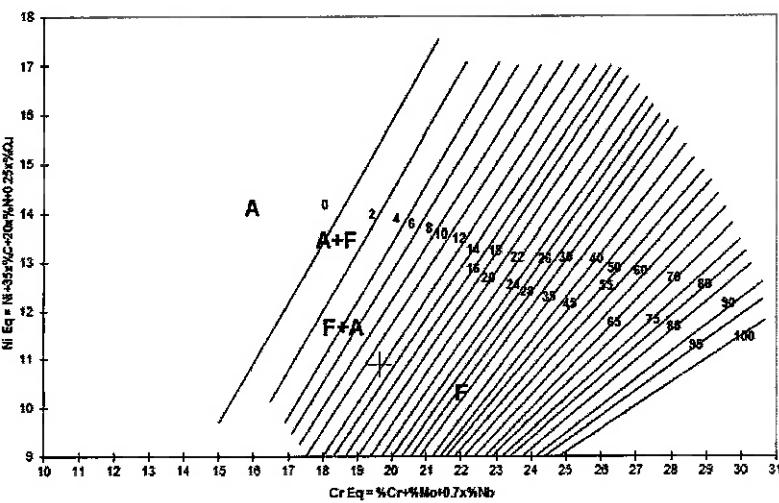


Figura 5.15 Gráfico WRC-1992 para ER308L com 70Hz

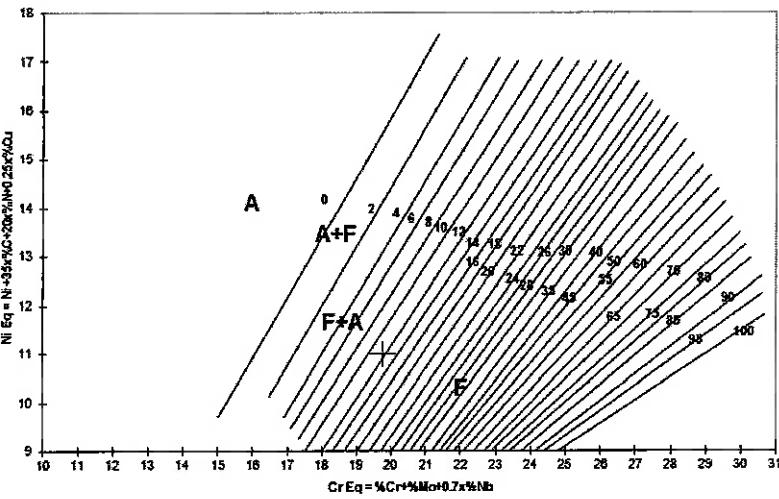


Figura 5.16 Gráfico WRC-1992 para ER308L com 100Hz

5.2.2 ER309L

Tabela 5.23 – Resultados do teor de ferrita para o ER309L no ferritoscópio

Frequência	Medições com Ferritoscópio					Média
20Hz	7,4	7,5	8,0	8,7	9,7	8,1
70Hz	7,7	7,7	8,0	8,3	9,9	8,0
100Hz	7,4	7,6	7,8	8,4	8,9	7,9

Tabela 5.24 – Resultados do teor de ferrita para o ER309L pelo WRC-1992

Frequência	Cr _{eq}	Ni _{eq}	FN
20Hz	22,89	14,57	11,0
70Hz	22,98	14,71	11,0
100Hz	22,80	14,81	10,0

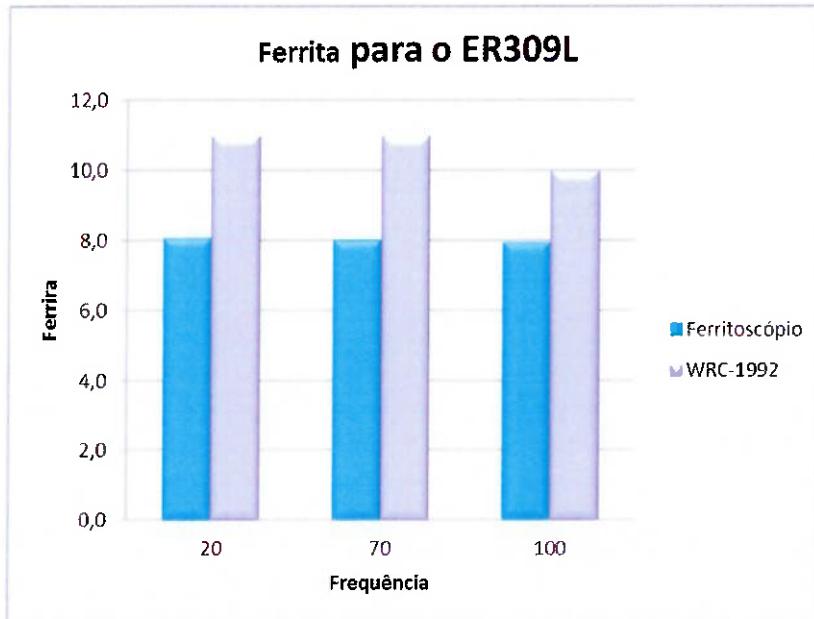


Figura 5.17 Comparação do teor de ferrita teórico com o medido para ER309L

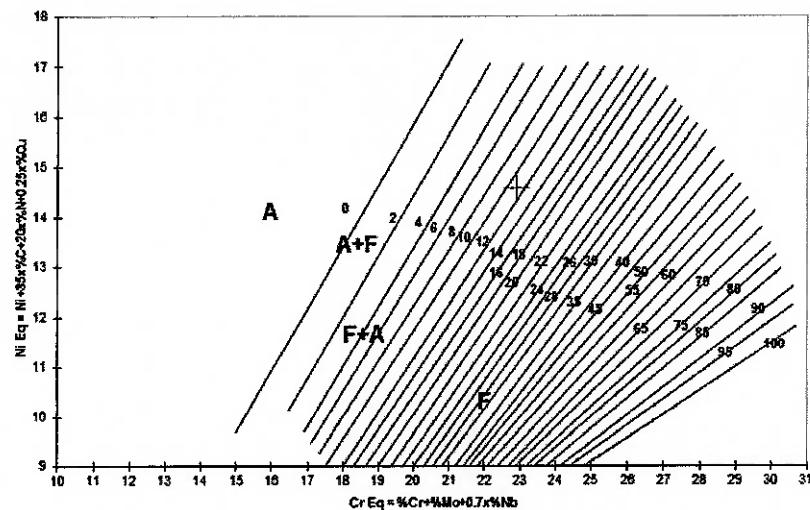


Figura 5.18 Gráfico WRC-1992 para ER309L com 20Hz

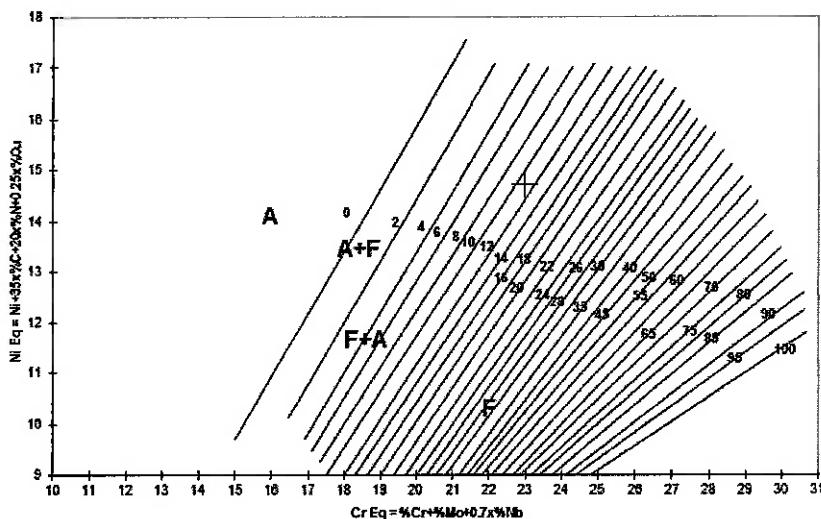


Figura 5.19 Gráfico WRC-1992 para ER309L com 70Hz

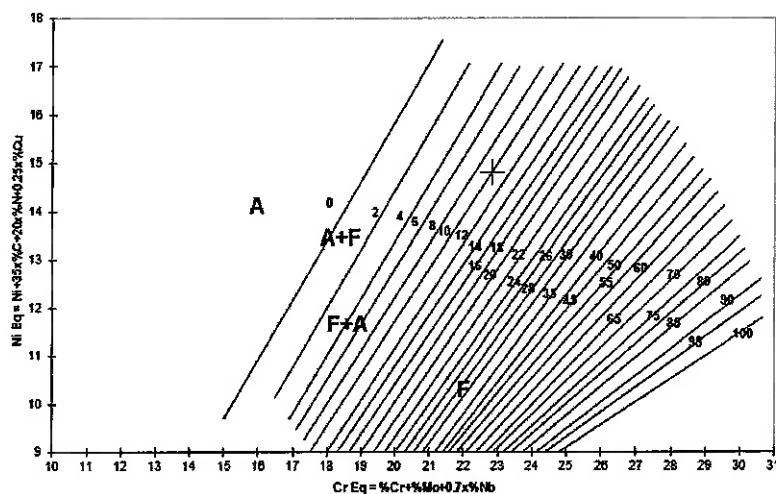


Figura 5.20 Gráfico WRC-1992 para ER309L com 100Hz

5.2.3 ER2209

Tabela 5.25 – Resultados do teor de ferrita para o ER2209 no ferritoscópio

Frequência	Medições com Ferritoscópio					Média
20Hz	33,7	34,5	36,1	37,0	38,4	35,9
70Hz	33,3	34,6	35,1	35,2	40,1	35,0
100Hz	34,5	34,9	34,7	35,6	36,1	35,1

Tabela 5.26 – Resultados do teor de ferrita para o ER2209 pelo WRC-1992

Frequência	Cr _{eq}	Ni _{eq}	FN
20Hz	25,71	10,83	72,5
70Hz	25,50	10,86	70,0
100Hz	25,76	11,20	71,0

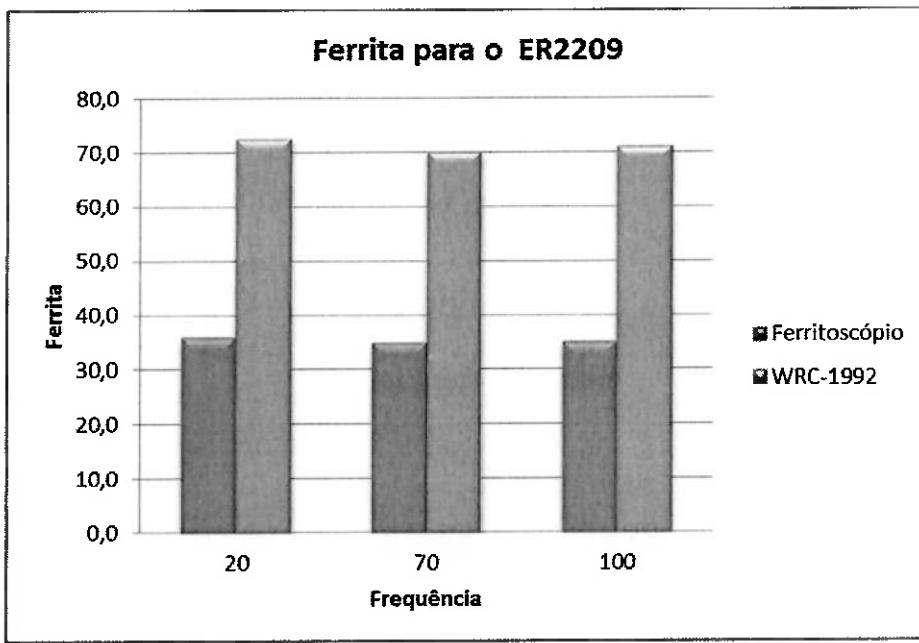


Figura 5.21 Comparação do teor de ferrita teórico com o medido.

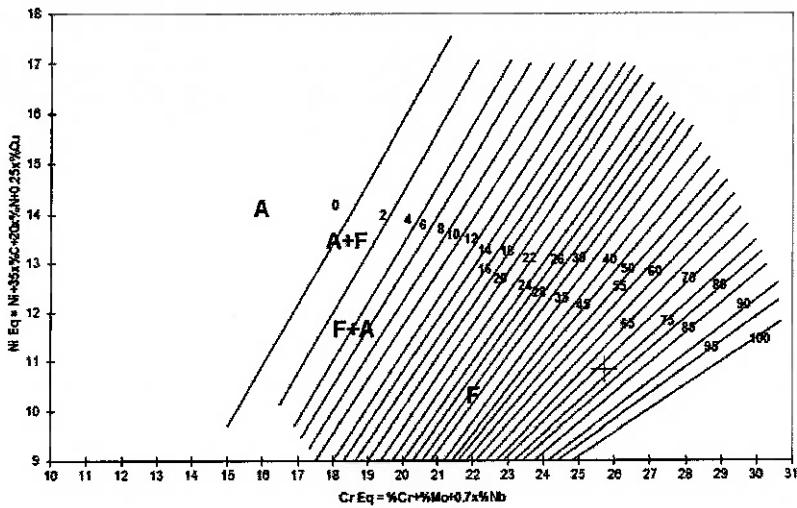


Figura 5.22 Gráfico WRC-1992 para ER2209 com 20Hz

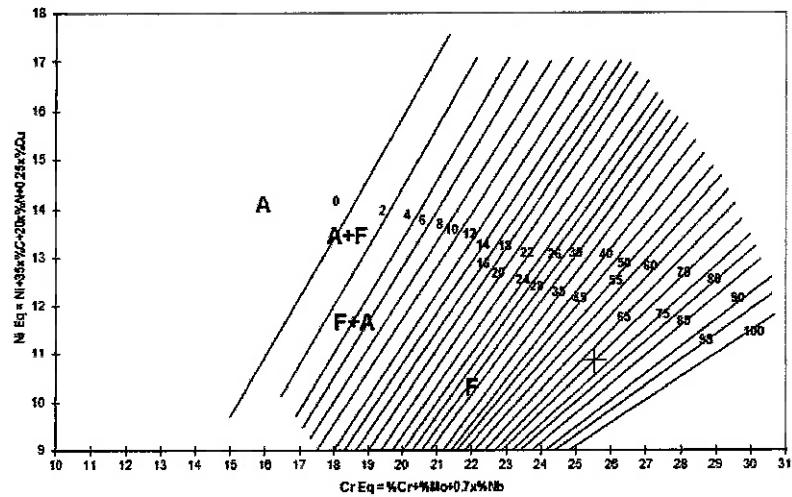


Figura 5.23 Gráfico WRC-1992 para ER2209 com 70Hz

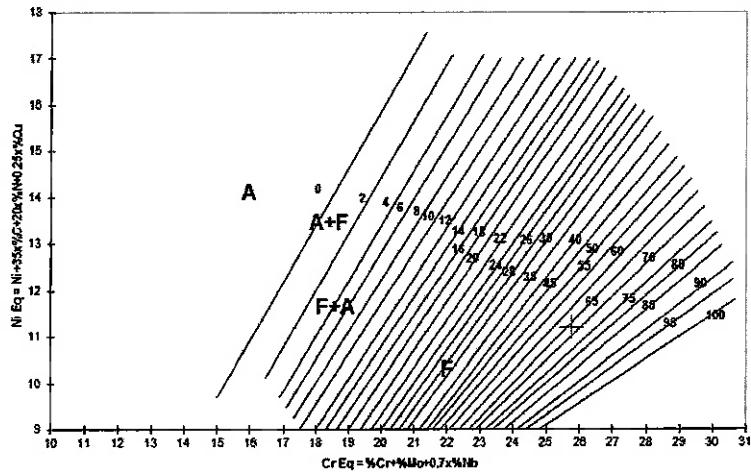


Figura 5.24 Gráfico WRC-1992 para ER2209 com 100Hz

5.2.4 ER2594

Tabela 5.27 – Resultados do teor de ferrita para o ER2594 no ferritoscópio

Frequência	Medições com Ferritoscópio					Média
20Hz	39,1	39,3	42,2	42,2	42,7	41,2
70Hz	37,0	37,2	37,5	38,8	40,1	37,8
100Hz	37,2	37,5	37,7	38,6	42,6	37,9

Tabela 5.28 – Resultados do teor de ferrita para o ER2594 pelo WRC-1992

Frequência	Cr _{eq}	Ni _{eq}	FN
20Hz	28,60	12,06	84,0
70Hz	28,51	12,76	72,0
100Hz	28,47	12,43	76,0

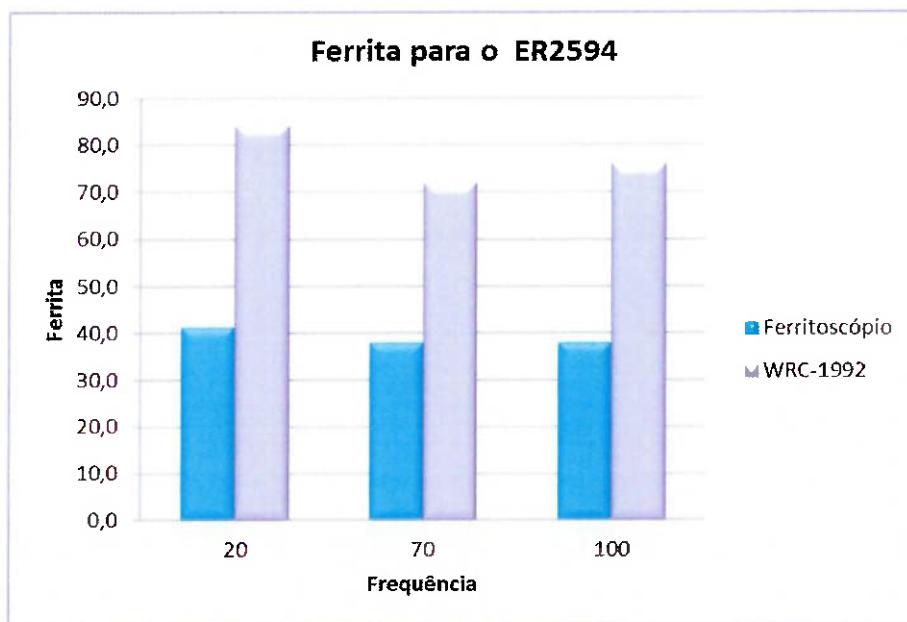


Figura 5.25 Comparação do teor de ferrita teórico com o medido.

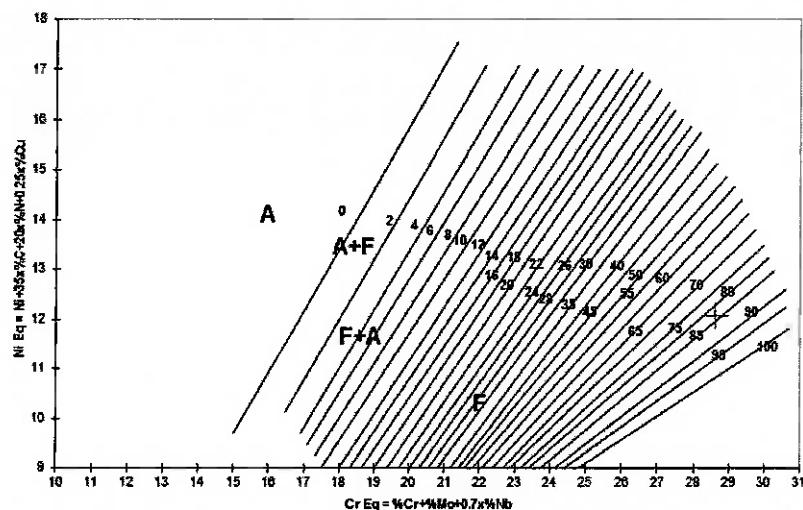


Figura 5.26 Gráfico WRC-1992 para ER2594 com 20Hz

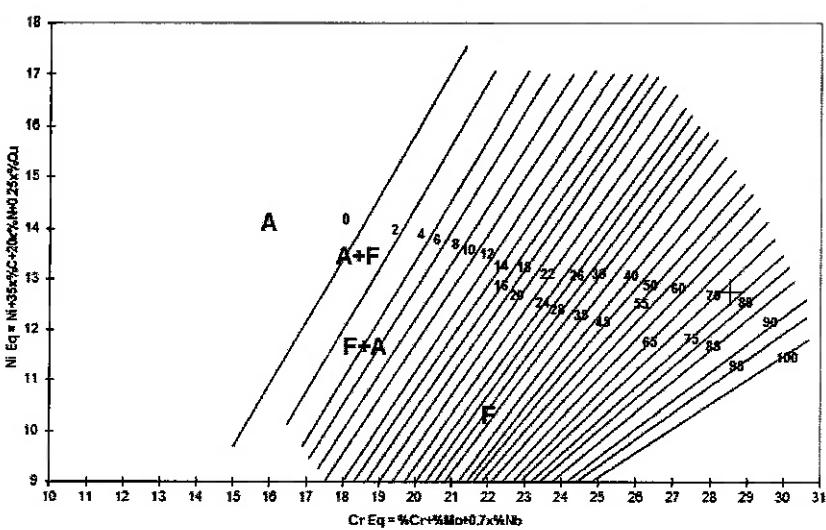


Figura 5.27 Gráfico WRC-1992 para ER2594 com 70Hz

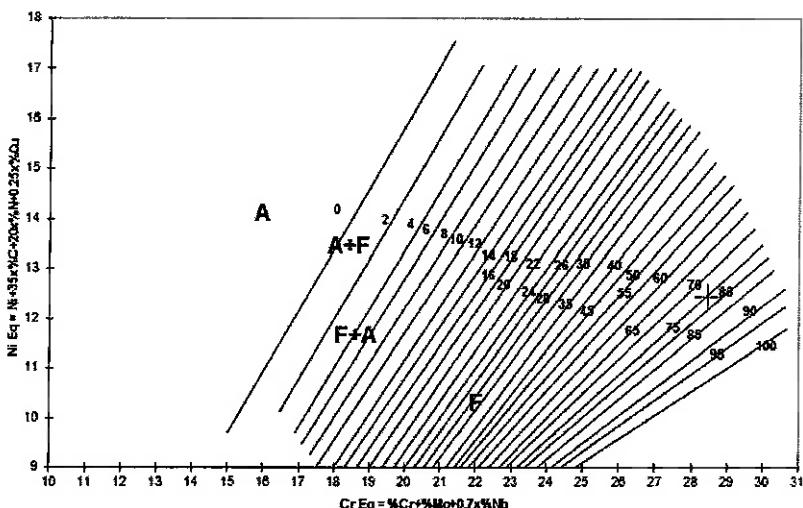


Figura 5.28 Gráfico WRC-1992 para ER2594 com 100Hz

Uma vez que não apresentaram variações consideráveis na composição química do material e o procedimento para confecção do material manteve a mesma energia de soldagem e mesmo método de resfriamento. Independente da variação da frequência o teor de ferrita manteve-se próximo para todos os materiais quando medido pelo ferritoscópio e mais próximo ainda quando calculado pelo diagrama de WRC-1992.

O que se pode observar é que em todos os casos, os resultados obtidos pelo diagrama WRC-1992 é sempre superior ao obtido experimentalmente, principalmente nas ligas duplex. De maneira geral os resultados teóricos e práticos apresentam uma variação por diversos fatores: calibração do equipamento, ponto de análise na peça, preparação do corpo de prova. Entretanto nos duplex esse chegou a mais de 10%, sendo que a análise química e do teor de ferrita foram feitos nos mesmo corpos de prova, na mesma região. Essa variação pode ter sido causada, devido à calibração do próprio ferritoscópio, uma vez que quando se passou os padrões quanto maior o valor do padrão maior era a diferença do valor lido.

5.3 Concentrações de Gases

Tabela 5.29 – Resultados de concentração de Oxigênio em ppm para os quatro arames soldados nas três frequências utilizadas

Arame:	ER308L	ER309L	ER2209	ER2594
20Hz	290	330	390	252
70Hz	232	310	362	370
100Hz	250	280	320	370

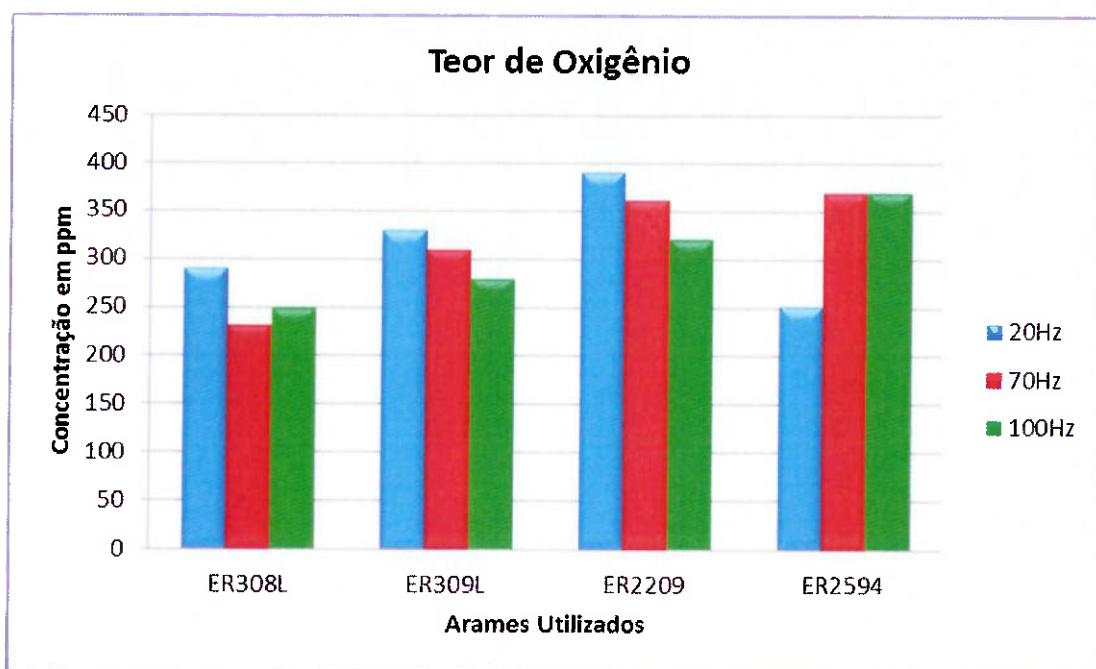


Figura 5.29 Gráfico com os teores de Oxigênio para todos os arames

Com a alteração da frequência não se obteve uma grande variação na concentração de oxigênio, estando no máximo 30ppm para alguns casos.

Destaca-se que para os arames ER309L e ER2209 com a menor frequência se tem a maior concentração de Oxigênio e com a maior frequência se tem a menor concentração deste mesmo elemento.

E com exceção do ER2594, todos os demais depósitos tiveram a maior concentração de Oxigênio com a menor frequência utilizada.

Tabela 5.30 – Resultados de concentração de Nitrogênio em ppm para os 4 arames soldados nas 3 frequências utilizadas

Arame:	ER308L	ER309L	ER2209	ER2594
20Hz	680	670	1090	1120
70Hz	690	670	1020	1470
100Hz	670	680	1060	1420

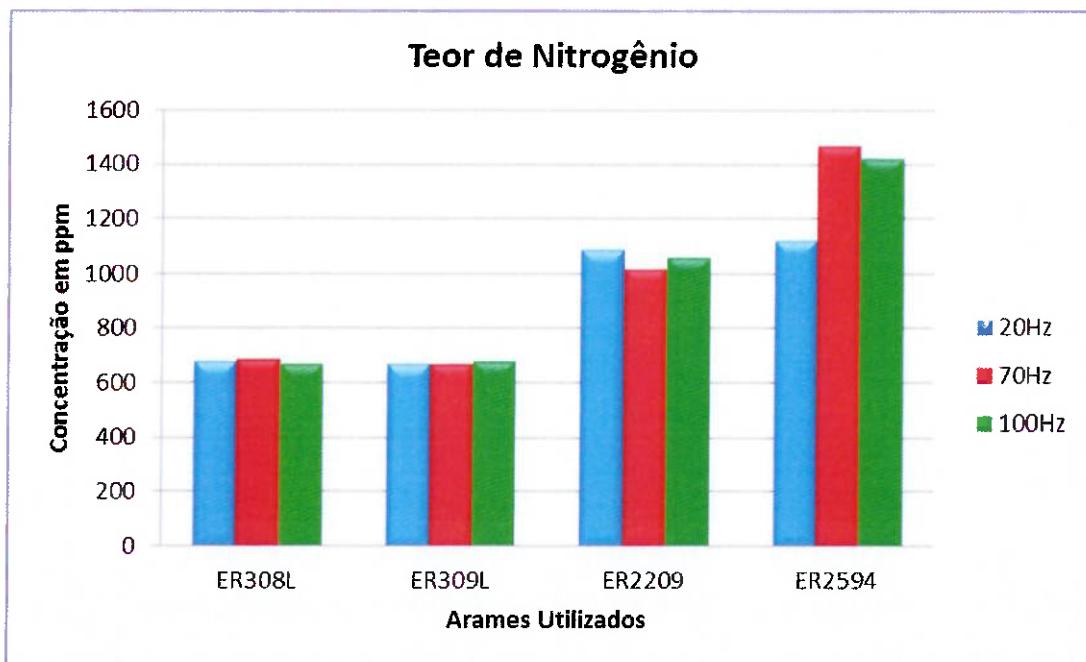


Figura 5.30 Gráfico com os teores de Nitrogênio para todos os arames

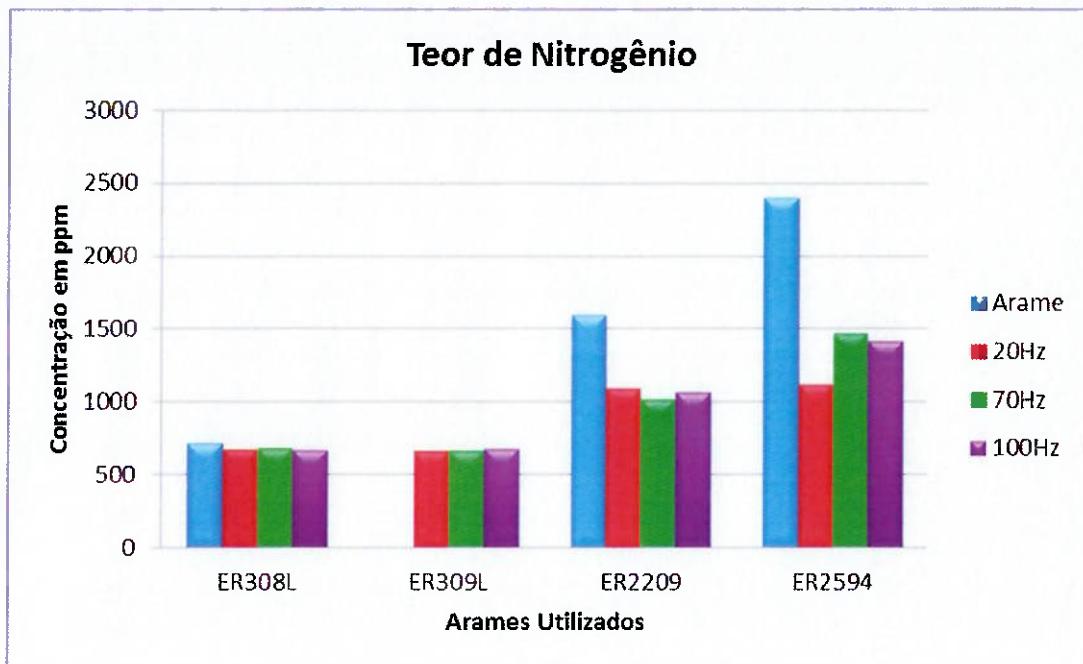


Figura 5.31 Gráfico comparativo com o Nitrogênio inicial do arame.

De maneira geral todos os arames perderam Nitrogênio para a atmosfera e suas concentrações se mantiveram próximas apesar da alteração da frequência. Um ponto a se destacar é para os arames duplex que tiveram uma queda significativa (a cima de 0,1%) na concentração do Nitrogênio. O que é explicável, pois quanto maior a concentração mais suscetível a reagir o material se encontra. Mas por outro lado isso demonstra a perda de um elemento formador de austenita, o que pode afetar diretamente a formação de estrutura do metal de solda.

6. CONCLUSÕES.

Com base nos materiais, equipamentos e materiais utilizados pode-se concluir que:

1. A variação de frequência não demonstrou interferir de maneira significativa na composição química do metal de solda para os elementos de liga, como Cr e Ni. Entretanto para elementos como C, S, P, O e N teve-se um efeito mais significativo nas suas concentrações.
2. Ao se comparar a composição inicial do arame com o metal de solda, ocorreu sempre perda de elemento de liga. Ou seja, teve-se um decréscimo na concentração de Cr, Ni, Mo.
3. A concentração de N no metal de solda é inferior a do arame, independente da frequência utilizada. Isso ocorre, devido a perda do gás N₂ na poça de fusão.
4. Ao se comparar a composição inicial do arame com o metal de solda, existe sempre uma deposição ou perda de elementos químicos do fluxo no metal de solda, elementos que participam ativamente, das reações de oxido-redução (metal-escória) como: C, Mn, P, S e O.
5. Com utilização de fluxos diferentes se tem uma variação de composição química diferente, principalmente de elementos contaminantes como P e S. O que apenas comprova a eficiência de "limpeza" conforme a composição do fluxo utilizado.
6. A variação de frequência não alterou os teores de ferrita no metal depositado.

7. Independente da variação de frequência, o tempo que a onda quadrada alternada permanece em cada polaridade, na teoria, demonstra ser muito próxima, principalmente se levar em consideração a troca de polaridade na onda quadrada é imediata, o que não deveria afetar significativamente na composição química uma vez que a reação química também é imediata.
8. Uma menor frequência pode levar a uma maior concentração de Oxigênio no metal de solda, dependo do material a ser soldado.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Mantendo o mesmo critério deste trabalho e parâmetros soldar novos weld pads, mas variando o balanço e o offset da onda. Com o objetivo de verificar uma possível alteração química.
2. Comparar os resultados obtidos com corpos de prova soldados com tensão constante corrente continua (CV; DC+), a qual é o método mais utilizado hoje para soldagens desses materiais.
3. Com esses mesmo corpos de prova, realizar teste de micrografia para avaliar se a mudança de frequência alterou a estrutura do material.
4. Soldar corpos de prova com esses mesmos parâmetros e consumíveis e submete-los a ensaios mecânicos, com objetivo de avaliar uma possível alteração de resultados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H.; *Soldagem: Processos e Metalurgia*. São Paulo: Edgar Blücher, 1995.
2. *WELDING Process. The Procedure Handbook of Arc Welding*. 43º Ed. Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 2000.
3. PARANHOS, R.; SOUZA, A. C.; *Soldagem Ao Arco Submerso*. Coleção Soldagem 2000. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 2000.
4. *WAVEFORM Control Technology®: Surface Tension Transfer® – Open Root*. Cleveland: The Lincoln Electric Company, 2006. (Relatório Técnico, NX3.10 – Fev./03).
5. CALLISTER, W.D.J.; *Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
6. FILHO, C.A.; *Metalurgia da Soldagem*. Centro federal de educação tecnológica do Pará, 2008.
7. KOU, S.; *Welding Metallurgy*. 2. ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2002.
8. MACHADO, I.G.; *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Porto Alegre: 1996. Disponível em: <<http://www.ct.ufrgs.br/lstc/>> Acesso em: 1 mai. 2010
9. MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRANCARENSE, A.Q.; *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
10. NUNES, R.M.; *ASM Handbook: Welding Brazing and Soldering*. Estados Unidos: ASM International, 1993. v. 6.

11. BERMEJO, M. A. V.; *Predictive and Measurement Methods for Delta Ferrite Determination in Stainless Steel*. Welding Journal, 91. Abril, 2012
12. Modenesi, P. J.; *Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis*. Osasco: Senai, 2001.
13. IMOA. (2009); *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels*. 2.ed; Londres, Inglaterra: International Molybdenum Association.
14. TOMA, R. E.; *Comparação de juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304 para aplicação em baixa temperatura utilizando-se a soldagem por arco submerso*; São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.
15. The American Society of Mechanical Engineers. *Boiler and Pressure Vessel Code - Section IX*; New York: ASME, 2011.