



Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Departamento de Engenharia Mecânica

Monografia de Especialização em Soldagem

***AVALIAÇÃO METALÚRGICA DA SOLDAGEM DE
REVESTIMENTO COM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
SOBRE AÇO ASTM A-36***

Edésio Edmur

Fabiano Souza

Belo Horizonte, 29 de Dezembro de 2016



Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Departamento de Engenharia Mecânica

***AVALIAÇÃO METALÚRGICA DA SOLDAGEM DE
REVESTIMENTO COM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
SOBRE AÇO ASTM A-36***

Monografia de Especialização em Soldagem
apresentada ao Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2016

Resumo

A soldagem de revestimento é o processo em que uma camada de metal de adição é depositada sobre a superfície de outro material com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas. É geralmente empregada para prorrogar a vida útil de peças que não possuem todas as propriedades necessárias para uma dada aplicação, para recuperação de elementos afetados pelo desgaste ou corrosão ou para criação de superfícies com características especiais.

O emprego da soldagem de revestimento para a criação de superfícies com características especiais tem aumentado no ambiente industrial e, considerando os diversos tipos de materiais para revestimentos, os aços inoxidáveis se caracterizam como uma das aplicações mais frequentes. Para estes casos, aços inoxidáveis são geralmente depositados sobre superfícies de aços carbono ou aços de baixa liga, produzindo uma camada com propriedades anti-corrosivas e de resistência necessárias para suportar ambientes sujeitos ao alto desgaste por corrosão. Os resultados deste processo têm tornado essa aplicação bastante atrativa, na medida em que superfícies resistentes à ambientes corrosivos podem ser produzidas a partir de materiais comuns e de menor custo, em comparação ao emprego de componentes puramente de aços inoxidáveis, os quais apresentam custos elevados. Portanto, as aplicações da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis se estendem entre os mais diversos tipos de indústrias, como as petrolíferas, químicas, alimentícias, agrícolas, nucleares, navais, ferroviária, de construção civil, entre várias outras.

O objetivo do presente trabalho foi uma avaliação metalúrgica de caráter didático da soldagem de revestimento de inoxidável austenítico sobre uma chapa de aço carbono ASTM A-36. Onde foram realizadas simulações de revestimento de duas camadas em corpos de prova com eletrodos de diferentes classes de aço inoxidável. Foram analisadas as diluições e feito uma análise das microestruturas obtidas, e estas comparadas com a previsão de diagramas constitucionais, em particular, com o diagrama de Schaeffler.

Palavras-chaves: *Soldagem de revestimento, soldagem dissimilar, aços inoxidáveis austeníticos e diagrama de Schaeffler*

Abstract

The welding coating is the process in which an additional metal layer is deposited on the surface of another material in order to obtain desired properties or dimensions. It is generally used to extend the useful life of parts that do not have all the properties necessary for a given application, for the recovery of elements affected by wear or corrosion or for the creation of surfaces with special characteristics.

The use of welding coating to create surfaces with special characteristics has increased in the industrial environment and, considering the different types of coating materials, stainless steels are characterized as one of the most frequent applications. For these cases, stainless steels are generally deposited on surfaces of carbon steels or low alloy steels, producing a layer with anti-corrosive and strength properties required to withstand environments subject to high corrosion wear. The results of this process have made this application quite attractive in that corrosion resistant surfaces can be produced from common and lower cost materials compared to the use of pure stainless steel components which are costly. Therefore, the applications of welding coating carbon steel with stainless steels extend across the most diverse types of industries, such as oil, chemical, food, agricultural, nuclear, naval, railway, construction, among several others.

The objective of the present work was a metallurgical evaluation of didactic character of the welding of austenitic stainless coating on an ASTM A-36 carbon steel plate. Where two layer coating simulations were carried out on test bodies with electrodes of different grades of stainless steel. Dilutions were analyzed and the microstructures obtained were analyzed, and these were compared with the prediction of constitutional diagrams, in particular, with the Schaeffler diagram.

Keywords: *Welding coating, dissimilar welding, austenitic stainless steels and Schaeffler diagram.*

Lista de figuras

Figura 1: Soldagem com Eletrodo Revestido.....	03
Figura 2: Equipamento de Soldagem com Eletrodo Revestido.....	04
Figura 3: Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento.....	08
Figura 4: Geometria desejada para deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40%.....	09
Figura 5: Diagrama de Equilíbrio Ferro-Cromo.....	11
Figura 6: Diagrama de equilíbrio Ferro-Níquel.....	12
Figura 7 : Sistema ternário Fe-Cr-Ni.....	13
Figura 8: Seção vertical para 18% de Cr do diagrama ternário Fe-Cr-Ni para teores de carbono inferiores a 0,03%.....	14
Figura 9: Classificação dos aços inoxidáveis para diferentes composições.....	16
Figura 10: Exemplo de morfologia da ferrita δ na zona fundida de aços inoxidável austenítico.....	17
Figura 11: Diagrama de Schaeffler.....	20
Figura 12: Regiões problemáticas típicas da soldagem de aços inoxidáveis.....	23
Figura 13: Problema metalúrgico encontrado em soldas de metais dissimilares $\alpha - \gamma$: a) Formação de zonas parcialmente diluídas na interface da linha de fusão de uma primeira camada revestimento; b) Diluição local calculada em 4 pontos a partir da linha de fusão.....	28
Figura 14: Eficiência de fusão. a) Baixa energia e baixa velocidade de soldagem. b) Alta energia e alta velocidade de Soldagem.....	31
Figura 15: Material de base – chapa ASTM A-36.....	32
Figura 16: Composição química ASTM A-36.....	32
Figura 17: Composição química eletrodo E308-17.....	33
Figura 18: Composição química eletrodo E309L-17.....	33
Figura 19: Composição química eletrodo E312L-17.....	34
Figura 20: Composição química eletrodo E316L-17.....	34
Figura 21: Equipamento de soldagem utilizado.....	35
Figura 22: Figura (23) – Especificações técnicas da inversora ZX7 200.....	35
Figura 23: Corpo de prova CP 1 - 1ª camada E308 / 2ª camada E308.....	37

Figura 24: Corpo de prova CP 2 –Superior: 1ª camada E309 / 2ª camada E308	
Infeior : 1ª camada E309 / 2ª camada E3016.....	37
Figura 25: Corpo de prova CP 2 –Superior: 1ª camada E312 / 2ª camada E308	
Infeior : 1ª camada E312 / 2ª camada E316.....	38
Figura 26: Reagente “ <i>Marble</i> ”	38
Figura 27: Corpos de prova após retirada das amostras	39
Figura 28: Amostras embutidas para micrografia.....	39
Figura 29: Amostra ampliada	40
Figura 30: O ferritoscópio.....	40
Figura 31: Fórmula para cálculo da diluição.....	41
Figura 32: Imagem da planilha com diagrama de Schaeffler	42
Figura 33: Macrografia dos corpos de prova.....	43
Figura 34: Macrografia rasterizada em AutoCad E 308-17	44
Figura 35: Macrografia rasterizada em AutoCad E 309L-17	44
Figura 36: Macrografia rasterizada em AutoCad E 312L-17	45
Figura 37: Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E308 / E308.....	46
Figura 38: Micrografia 1ª camada: Austenita + Martensita.....	46
Figura 39: Micrografia 2ª camada: Austenita + Ferrita δ	46
Figura 40: Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E309 / E308.....	47
Figura 41: Micrografia 1ª camada: Austenita + Martensita.....	47
Figura 42: Micrografia 2ª camada: Austenita + Ferrita δ	47
Figura 43: Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E309 / E316.....	48
Figura 44: Micrografia 1ª camada: Austenita + Martensita.....	48
Figura 45: Micrografia 2ª camada: Austenita + Ferrita δ	48
Figura 46: Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E312 / E308.....	49
Figura 47: Micrografia 1ª camada: Austenita + Ferrita δ	49
Figura 48: Micrografia 2ª camada: Austenita + Ferrita δ	49
Figura 49: Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E312 / E316.....	50
Figura 50: Micrografia 1ª camada: Austenita + Ferrita δ	50
Figura 51: Micrografia 2ª camada: Austenita + Ferrita δ	50
Figura 52: Ferritoscópio x Diagrama de Schaeffler.....	51
Figura 53: Material de base 200x – reagente Nital 5%	52
Figura 54: ZTA 500x - reagente Nital 5%	52

Figura 55: Zona de ligação 200x – reagente Nital 5%.....	53
Figura 56: 1ª camada E308 500x – reagente “Marble”.....	54
Figura 57: Zona de ligação da 1ª camada E308 com a 2ª camada E 308 200x – reagente Marble.....	54
Figura 58: 2ª camada E308 500x – reagente “Marble”.....	55
Figura 59: 1ª camada E309 500x – reagente “Marble”.....	56
Figura 60: Zona de ligação da 1ª camada E309 com a 2ª camada E 308 200x – reagente Marble.....	56
Figura 61: 2ª camada E308 500x – reagente “Marble”.....	57
Figura 62: 1ª camada E309 500x – reagente “Marble”.....	57
Figura 63: Zona de ligação da 1ª camada E309 com a 2ª camada E 316 200x – reagente Marble.....	58
Figura 64: 2ª camada E316 500x – reagente “Marble”.....	58
Figura 65: 1ª camada E312 500x – reagente “Marble”.....	59
Figura 66: Zona de ligação da 1ª camada E312 com a 2ª camada E 308 200x – reagente Marble.....	59
Figura 67: 2ª camada E308 500x – reagente “Marble”.....	60
Figura 68: 1ª camada E312 500x – reagente “Marble”.....	61
Figura 69: Zona de ligação da 1ª camada E312 com a 2ª camada E 316 200x – reagente Marble.....	61
Figura 70: 2ª camada E316 500x – reagente “Marble”.....	62
Figura 71: Ensaio de dureza E308 / E308”.....	62
Figura 72: Ensaio de dureza E309 / E308”.....	63
Figura 73: Ensaio de dureza E309 / E316”.....	63
Figura 74: Ensaio de dureza E312 / E308”.....	64
Figura 75: Ensaio de dureza E312 / E316”.....	64
Tabela 01: Parâmetros de soldagem.....	36

Lista de abreviaturas e símbolos

API - American Petroleum Institute

ASME - American Society of Mechanical Engineers

AWS - American Welding Society

Cp - Corpo de prova

D - Diluição

EPS - Especificação de Procedimento de Soldagem

ER - Eletrodo Revestido

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding

HV - Dureza Vickers

MA - Metal de Adição

MB - Metal de Base

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MO - Microscopia Ótica

MS - Metal de Solda

SMAW - Shielded Metal Arc Welding

TD - Taxa de Deposição

ZDE - Zonas de Dureza Excessiva

ZF - Zona Fundida

ZPD - Zona Parcialmente Diluída

ZTA - Zona Termicamente Afetada

Sumário

1– Introdução	01
1.1 – Aspectos Gerais.....	01
1.2 – Objetivos.....	02
2 – Revisão Bibliográfica	03
2.1 – Processos de Soldagem – Eletrodo Revestido.....	03
2.2 – Soldagem de Revestimento.....	06
2.2.1 – Introdução.....	06
2.2.2 – Ligas para Revestimento.....	07
2.2.3 – Características do Processo.....	07
2.3 – Soldagem de Revestimento de Aço Carbono com Aço Inoxidável.....	09
2.4 – Diagramas de Equilíbrio.....	10
2.4.1 – Diagramas Ternário FE-Cr-Ni.....	13
2.4.2 – Estrutura da Zona Fundida	16
2.5 – Diagramas Constitucionais Empíricos.....	18
2.5.1 – O Diagrama de Schaeffler.....	18
2.5.2 – A importância do Diagrama de Schaeffler.....	18
2.5.3 – Prevenção do Depósito de Solda.....	19
2.5.4 – A construção do Diagrama de Schaeffler.....	19
2.5.5 – Os Constituintes Encontrados por Schaeffler.....	19
2.5.6 – Eixos do Diagrama.....	20
2.5.7 – Os Elementos Reagentes.....	20
2.5.8 – Elementos Gamagênicos.....	21
2.5.9 – Elementos Alfacênicos.....	21
2.5.10 – Conceito de Níquel Equivalente.....	22
2.5.11 – Conceito de Cromo Equivalente.....	22
2.5.12 – A Quantidade de Ferrita.....	22
2.5.13 – Aplicações do Diagrama de Schaeffler.....	23
2.6 – Aspectos Metalúrgicos na Soldagem de Revestimento.....	26
2.7 – Fatores de Processo da Soldagem de Revestimento.....	28
2.7.1 – Energia de Soldagem	30
3 – Materiais e Métodos	32
3.1 – Material de base.....	32

3.2 - Metais de adição.....	33
3.3 - Processo e Equipamento.....	35
3.4 - Os Parâmetros de Soldagem.....	36
3.5 - Os Corpos de Prova.....	36
3.6 - Macrografias.....	38
3.7 - Micrografias.....	39
3.8 - Medição de Ferrita pelo Ferritoscópio.....	40
3.9 – Cálculo da Taxa de Diluição.....	41
3.10 – Planilha em Excel com Diagrama de Schaeffler.....	41
4 – Resultados Obtidos.....	43
4.1 – Macrografia.....	43
4.2 – Taxa de Diluição.....	43
4.3 – Diagrama de Schaeffler x Micrografia.....	46
4.4 – Diagrama de Schaeffler x Ferritoscópio.....	51
4.5 – Avaliação Microestrutural.....	51
4.6 – Ensaio de Dureza.....	62
5 – Análise dos Resultados.....	65
6 – Conclusões.....	66
7 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	67
8 – Referências Bibliográficas.....	68

1 – Introdução

1.1 – Aspectos Gerais

Revestimentos de aço carbono com aço inoxidável têm sido largamente utilizados em muitos produtos da indústria química, petroquímica e nuclear. As aplicações dos revestimentos não somente satisfazem aos diferentes requisitos de variadas condições de serviços, tais como resistência mecânica, resistência à corrosão e propriedades magnéticas, como também resultam em grande economia, na redução de custos de produtos, em substituição da utilização de metais mais nobres e de altos custos.

Devido a sua elevada resistência à corrosão, os revestimentos de aço carbono com aço inoxidável são amplamente utilizados em diversos equipamentos industriais. Em muitos casos, estes materiais, por estarem submetidos a severas condições de serviço em ambientes agressivos, sofrem desgastes, necessitando muitas vezes de reparo por solda. Na soldagem de manutenção, muitas vezes utilizam-se eletrodos de aços inoxidáveis em operações de revestimento e em juntas dissimilares.

A soldagem de revestimento de aço carbono com aço inoxidável é caracterizada por diferentes gradientes de temperaturas e mudanças microestruturais, os quais produzem grandes variações em suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. É um processo mais complexo de soldagem que além das dificuldades normais encontradas, também apresentam os problemas já conhecidos da união dos metais individualmente e os problemas particulares que surgem quando se combinam ligas de diferentes composições. A situação complica-se ainda mais quando a soldagem de revestimento é realizada com adição de mais de uma camada e com diferentes tipos de metais de adições, o que é comum em processo de revestimento de aço carbono com aço inoxidável.

O revestimento por solda é realizado com a aplicação localizada de calor podendo desenvolver transformações metalúrgicas que devem ser estudadas particularmente para cada material. Como resultado, alterações das propriedades do material, nem sempre desejáveis ou aceitáveis, podem ocorrer na região do revestimento. A maioria destas alterações depende das reações ocorridas durante a solidificação e resfriamento do cordão de solda e de sua microestrutura final. Assim, a compreensão desses fenômenos metalúrgicos é importante em muitas aplicações

da soldagem .

1.2 – Objetivos

Este estudo consiste na caracterização metalúrgica do revestimento de equipamentos de aço carbono com aço inoxidável austenítico, particularmente os da classe 300 (AWS 5.4, 1992) que apresentam excelente resistência mecânica, tenacidade à fratura em baixas temperaturas e resistência à corrosão neste meio, obtendo um aumento na vida útil destes equipamentos com menor custo de fabricação.

Por este motivo o revestimento de aço carbono com aço inoxidável austenítico, tem sido usado no processo de revestimento de equipamentos que operam submersos na indústria de petróleo off-shore. Os casos que foram analisados tratam-se da soldagem de revestimento do aço carbono ASTM A-36 pelos aços inoxidáveis austeníticos da classe 300 (308, 309, 312 e 316), aplicados pelo processo de soldagem a arco elétrico.

Dentre as opções de eletrodos revestidos inoxidáveis austeníticos, os consumíveis 308, 309, 312 e 316 possui posição de destaque, sendo recomendado para a soldagem dissimilar de aços inoxidáveis com aço carbono e baixa liga. Por possuírem uma composição nominal adequada, são indicados também na soldagem de aços estruturais, especialmente em condições de corrosão severa na qual são requeridos metais de solda com alta liga.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analisar as microestruturas obtidas e comparar com a previsão de diagramas constitucionais, em particular, com o diagrama de Schaeffler.
- Compreender os problemas de soldabilidade do aço inoxidável austenítico da classe 300 (AWS 5.4, 1992) em aço carbono, relacionando-os com o estudo metalúrgico do problema.

2 – Revisão Bibliográfica

2.1 - Processos de Soldagem – Eletrodo Revestido

O processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, também conhecido como SMAW (Shielded Metal Arc Welding), consiste na abertura e manutenção de um arco elétrico entre o eletrodo revestido e a peça a ser soldada, de modo a fundir simultaneamente o eletrodo e a peça. O metal fundido do eletrodo é transferido para a peça, formando uma poça fundida que é protegida na atmosfera (O_2 e N_2) pelos gases da combustão do revestimento do eletrodo. O metal depositado e as gotas ejetadas do metal fundido recebem uma proteção adicional por meio do banho de escória, a qual é formada pela queima de alguns componentes do revestimento.

O eletrodo revestido consiste em uma vareta metálica, chamada “alma”, trefilada ou fundida, que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para o enchimento da junta, recoberta por uma camada formada pela mistura de diferentes materiais, que formam o “revestimento” do eletrodo. O revestimento é colocado atualmente por extrusão. A figura (1) ilustra a soldagem com eletrodo revestido.

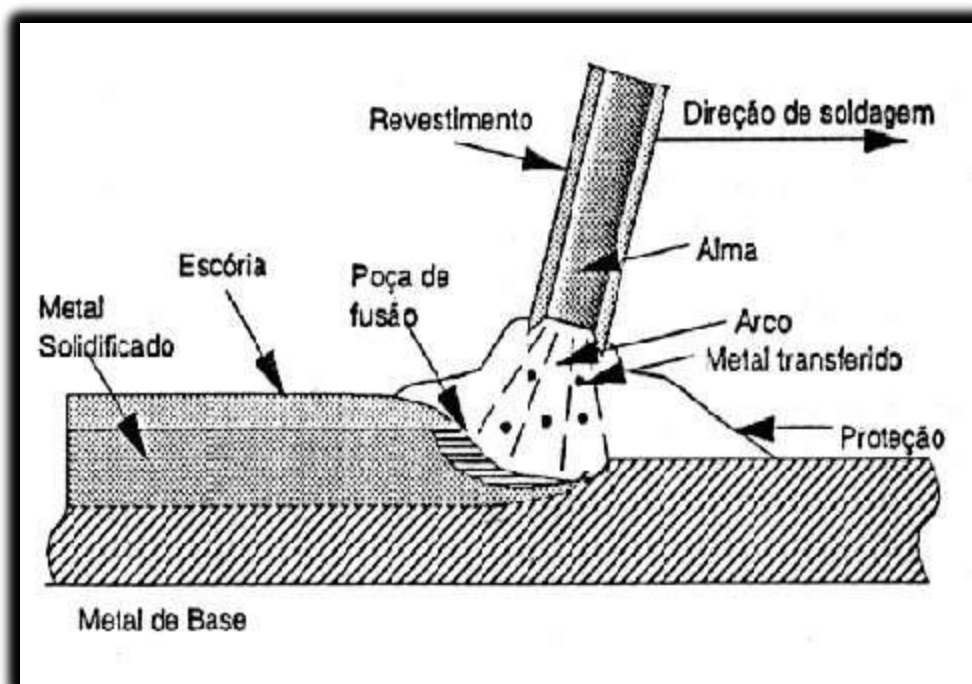


Figura (1) – Soldagem com Eletrodo Revestido (Bracarense, 2014).

As especificações de identificação da AWS são numeradas de acordo com o material que se pretende classificar. Entre estas especificações, as mais comuns são as utilizadas para aço carbono (AWS A5.1), para aços de baixa liga (AWS A 5.5) e para aços inoxidáveis (AWS A 5.4).

Na soldagem manual com eletrodo revestido, o soldador é responsável pela abertura e fechamento do arco elétrico, pela troca do eletrodo e pela execução dos movimentos de avanço e de mergulho do mesmo. A figura (2) ilustra o equipamento para soldagem com eletrodo revestido.

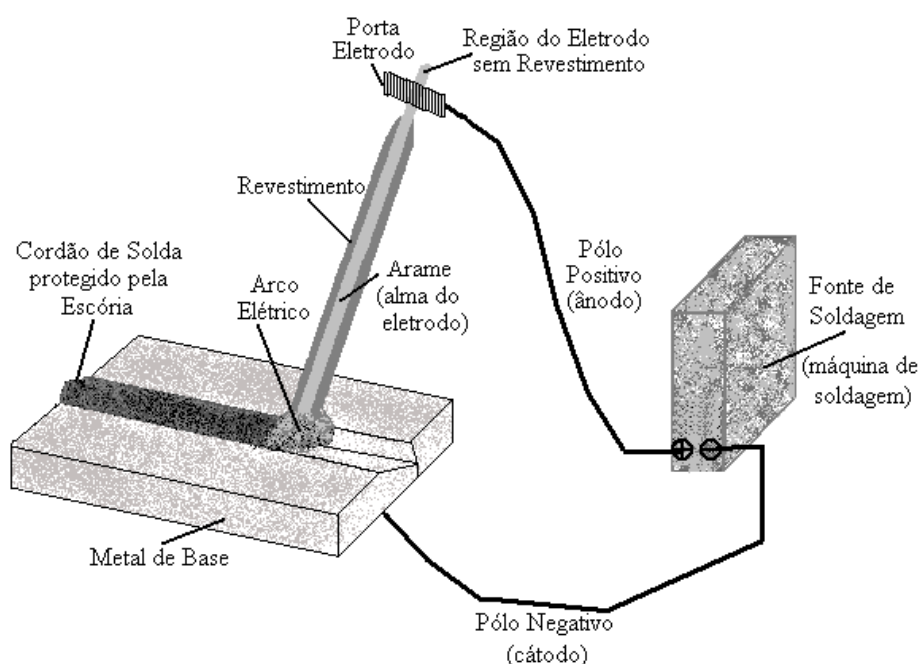


Figura (2) – Equipamento para Soldagem com Eletrodo Revestido (Bracarense, 2014).

Na soldagem manual com eletrodos revestidos, as principais variáveis operatórias são: tipo e diâmetro do eletrodo; tipo, polaridade e valor da corrente de soldagem; tensão e comprimento do arco; velocidade de soldagem; técnica de manipulação do eletrodo e a sequência de deposição e soldagem.

O diâmetro do eletrodo, seu tipo e espessura do revestimento determinam a faixa de corrente em que pode ser utilizado. Assim, a seleção do diâmetro deve ser baseada, entre outros fatores, na espessura do metal a ser soldado, na posição de soldagem e no tipo da junta. A utilização de um eletrodo excessivamente grande para uma dada espessura pode levar a perfuração da peça durante a soldagem, uma vez que a corrente mínima para esse eletrodo é elevada.

O revestimento consiste em uma mistura de certos ingredientes, combinados em proporções adequadas. Cada ingrediente que entra na composição do revestimento tem uma ou mais funções bem determinadas, e pode ser classificado como estabilizador do arco, formador de escória, gerador de gases redutores, desoxidante, fornecedor de elementos de liga, oxidante e finalmente, fixador do revestimento. Entre as funções do revestimento podemos citar:

- Formar escória para a proteção do metal fundido.
- Fornecer agentes que facilitem a remoção de escória ao controlar suas propriedades físicas e químicas.
- Formar escória para a proteção do metal fundido.
- Fornecer agentes que facilitem a remoção de escória ao controlar suas propriedades físicas e químicas.
- Em alguns casos ajustar a composição química do cordão pela adição de elementos de liga.
- Fornecer materiais para realizar ou possibilitar reações de refino metalúrgico, tais como desoxidação, dessulfuração, etc.;
- Facilitar a soldagem na diversas posições (cone, viscosidade);
- Reduzir o número de respingos e fumos;
- Possibilitar o uso de diferentes tipos de corrente e polaridade;
- Fornecer agentes que possibilitem o controle da taxa de deposição (quantidade de metal depositado por unidade de tempo);
- Controlar a temperatura do eletrodo, etc.

As principais vantagens e limitações associadas a este processo são listadas a seguir:

- O processo é o mais simples, em termos de necessidades de equipamentos.
- O custo de investimento em equipamentos é relativamente baixo.
- Oferece maior flexibilidade entre todos os processos de soldagem, pois pode ser usado em todas as posições (plana, vertical, horizontal, etc).
- Pode ser utilizado em praticamente todas as espessuras do metal base e em áreas de acesso limitado.
- O metal de solda e os meios de proteção desta solda são fornecidos pelo eletrodo revestido, não requerendo nenhum equipamento adicional.
- O processo é menos sensível a correntes de ar do que o processo de solda a arco de proteção gasosa (GMAW), um concorrente direto.

- É apropriado para a maioria dos metais e ligas metálicas comumente usadas.
- Por ser um processo tipicamente manual, o nível de habilidade do soldador é de fundamental importância para se obter uma solda de qualidade aceitável.
- Baixas taxas de deposição quando comparado com o processo GMAW.
- Como o eletrodo pode ser consumido até um comprimento mínimo, quando este comprimento é atingido, o soldador deve trocar a parte não consumida por um outro eletrodo.
- O processo é robotizado, porém a troca do eletrodo é uma limitação.

2.2 - Soldagem de Revestimento

2.2.1 Introdução

Atualmente, em razão da evolução tecnológica, tanto de processos como de materiais, é possível proteger eficazmente um determinado componente ou uma superfície metálica das ações de desgaste/corrosão por meio de um revestimento.

O revestimento pode ser executado por várias técnicas ou processos, como: pintura, eletrodeposição, aspersão térmica, soldagem etc. Entre as finalidades básicas do revestimento, pode-se citar: melhoria da eficiência do equipamento, mantendo cantos vivos nas bordas e arestas cortantes; redução no consumo de potência, mantendo a capacidade de corte; redução do custo de equipamentos e novas instalações, possibilitando peças revestidas de custo final mais baixo; recuperação de peças desgastadas/corroídas, sem necessidade de substituição; aumento da vida útil de instalações, peças e equipamentos, diminuição do tempo de parada de equipamentos e melhores soluções nos projetos de máquinas/equipamentos com aplicação de materiais resistentes a ação a qual a peça/equipamentos estará sujeita.

Para ter sucesso, o revestimento por soldagem necessita que se cumpram algumas etapas consideradas fundamentais; é importante definir os mecanismos atuantes para escolher um material de adição mais resistente contra as ações identificadas, elevando, dessa maneira, a vida útil das peças ou dos equipamentos.

2.2.2 Ligas para revestimento

As normas AWS A 5.13 e A 5.21 – ou ASME II, parte C – DIN 8555, além das específicas para resistir a corrosão – AWS A 5.4, AWS A 5.4, AWS A 5.9 e 5.22, a DIN 8556 etc., especificam e classificam consumíveis de soldagem para aplicação em soldagem de revestimento pelos mais diversos processos de soldagem a arco elétrico, seja para revestimento duro ou resistente a corrosão.

Principalmente as normas AWS apresentam algumas informações tecnológicas sobre as diversas ligas classificadas nas suas especificações.

A importância e a variedade no campo de revestimento têm resultado em uma grande quantidade e variedade de ligas, tornando cada vez mais dificultosa a seleção do metal de adição mais resistente. Uma análise cuidadosa das condições de serviço e uma combinação das propriedades do depósito de solda, complementada pelo estabelecimento seguro de dados de testes em serviço, apresentam-se ainda como o melhor método de seleção de aplicação de determinada liga.

A classificação pode ser baseada em vários fatores incluindo dureza, composição e condições de serviço em testes específicos; neste caso, o método mais utilizado é uma combinação entre composição química e estrutura do metal depositado.

2.2.3 Características do Processo

A seleção do processo de soldagem para revestimento é tão importante quanto a seleção da liga. Os requerimentos de desempenho em serviço não são ditados somente pela seleção da liga, mas, também, sofrem forte influência do processo de soldagem selecionado. Outros fatores técnicos envolvem a seleção do processo, incluindo, mas não limitado, as propriedades e a qualidade do revestimento, as características físicas da peça, as propriedades metalúrgicas do metal de base, a forma e a composição da liga de revestimento e a habilidade do soldador. Ultimamente, predominam as condições econômicas e o custo como fatores determinantes na seleção final do processo.

Os depósitos de revestimento efetuados por soldagem são caracterizados por uma estrutura bruta de fusão com macro e micro segregações e variações de composição química entre passes ou camadas que influenciam as suas características. Não é de surpreender que a qualidade e as propriedades do revestimento soldado dependam do processo e da técnica de soldagem.

As variações na composição química derivam da diluição com o metal de base durante a soldagem, embora a absorção de carbono na soldagem oxiacetilênica e a perda por volatilização nos processos de soldagem a arco sejam fatores a considerar.

A diluição expressa a porcentagem do metal de base que participa da zona fundida. Uma diluição de 10% indica que a zona fundida é formada por 10% do metal de base e 90% da liga de revestimento. A resistência ao desgaste, a resistência a corrosão e outras propriedades desejáveis da liga de revestimento geralmente se degradam quando a diluição aumenta.

Provavelmente, a maior diferença entre a soldagem de chanfros e a deposição de liga de revestimento é que a preocupação com a diluição é mais comum ao revestimento em virtude da diferença de composição química entre o metal de base e metal de adição. O perfil geométrico desejado, conforme figura (3), para soldagens de revestimento se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D). A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo.

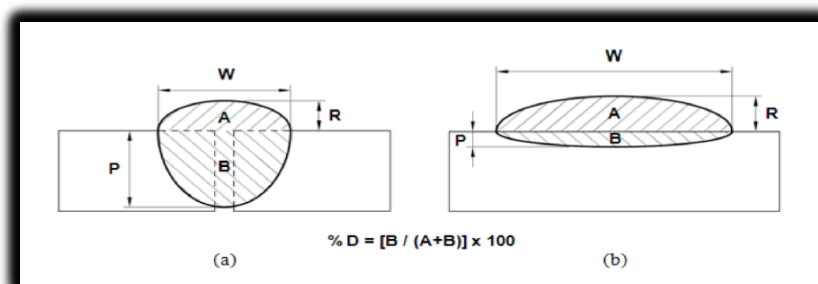


Figura (3) – Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada(aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento (Elias, 2013).

As principais variáveis no revestimento por soldagem são a corrente e tensão, comprimento livre, velocidade de avanço, a posição de soldagem, a proteção do arco, e o padrão de oscilação do eletrodo.

Do ponto de vista metalúrgico, a composição e as propriedades do revestimento são fortemente influenciadas pela diluição, que pode ser obtida com cada processo de soldagem e deve ser considerada para selecionar devidamente a combinação entre metal de solda e processo de soldagem para cada aplicação particular. Um bom exemplo é o revestimento em aço de baixa liga com eletrodos de aço inoxidável pelo processo com eletrodo revestido. Este processo normalmente apresenta de 15% a 50% de diluição,

dependendo da forma de deposição dos cordões de solda. Assim, se for utilizado um eletrodo AWS E 308 (19% de cromo e 9% de níquel) sobre aço-carbono ou de baixa liga, a primeira camada do depósito conterà cerca de 12% Cr e 6% Ni. Esse depósito apresentaria redução nas propriedades mecânicas e resistência a corrosão. Por outro lado, se for utilizado um eletrodo E 309 (25% Cr e 12% Ni) com as mesmas condições de soldagem, o depósito conterà cerca de 16% Cr e 8% Ni. Esse depósito teria melhor resistência à corrosão e melhores propriedades mecânicas, como ductilidade. A diluição perto de 15% melhorará ainda mais essas propriedades. A figura (5) ilustra a geometria de uma soldagem de revestimento.

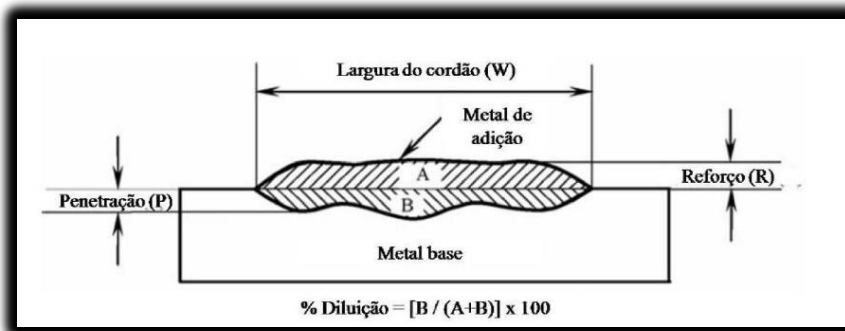


Figura (4) – Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40% (Elias, 2013).

2.3 - Soldagem de Revestimento de Aço Carbono com Aço Inoxidável

Esta é uma aplicação muito comum na indústria. Os motivos para esta grande utilização incluem, do lado dos aços carbono e C-Mn de grau estrutural, o seu menor custo em relação aos aços inoxidáveis austeníticos, aliados a uma maior resistência mecânica, principalmente em relação ao limite de escoamento e, do lado dos aços inoxidáveis, a sua resistência à corrosão muito superior e necessária em aplicações em que um meio agressivo esteja em contato com alguma parte do equipamento.

Assim, é uma prática comum projetar e fabricar equipamentos em aço carbono estrutural e revestir, onde for necessário, a sua superfície com um material mais nobre, principalmente em relação à resistência a corrosão. No Brasil isto é feito para diversos componentes de hidroelétricas, incluindo diferentes partes que permanecem em contato com a água, como palhetas das turbinas, condutores e distribuidores de água. Um metal de solda tipo 18%Cr-8%Ni já é suficiente para garantir uma resistência à corrosão

adequada. Uma única exceção ocorre quando a região estiver sujeita a problemas de cativação, neste caso ligas são específicas são preferencialmente utilizadas.

Devido à necessidade de se recobrir grandes superfícies, processos de soldagem automáticos, mecanizados ou semi-automáticos e com elevada taxa de deposição, como arco submerso (SAW) e arame tubular (FCAW), são preferidos. Para se garantir uma alta produtividade, um valor elevado de corrente deve ser usado, o que pode levar a uma diluição muito alta (de até 70%) e, assim, alterar significativamente a composição do metal de solda, induzindo a problemas de ordem metalúrgica.

2.4 – Diagramas de Equilíbrio

A compreensão de diagramas de fases para sistemas de ligas é extremamente importante, pois estes podem fornecer informações básicas iniciais para se estimar a estrutura do material. Por sua vez, existe uma forte correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas do material. Tais diagramas fornecem informações valiosas sobre os fenômenos de diversos processos, como a fusão, a fundição, a cristalização, dentre outros. Grande parte dos aços inoxidáveis são ligas austeníticas de ferro-cromo-níquel, sendo os mais usuais os chamados aços 18/8, onde se tem cerca de 18% de Cr e 8% de Ni (AISI 302). Estes aços mantêm sua estrutura a temperatura ambiente, isto é, transformações γ - α não ocorrem.

Contudo, a ocorrência de segregação e precipitação durante o resfriamento e tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem influencia diretamente na resistência à fissuração, tenacidade e propriedades de corrosão da junta soldada. As possíveis reações metalúrgicas que ocorrerão no metal de solda e na zona termicamente afetada podem ser previstas com auxílio dos diagramas de equilíbrio

O elemento cromo restringe o intervalo de existência da fase γ (austenita), à medida que se aumenta o conteúdo de liga, até este desaparecer completamente com aproximadamente 12% de cromo. A figura (5) representa o diagrama de equilíbrio Ferro-Cromo.

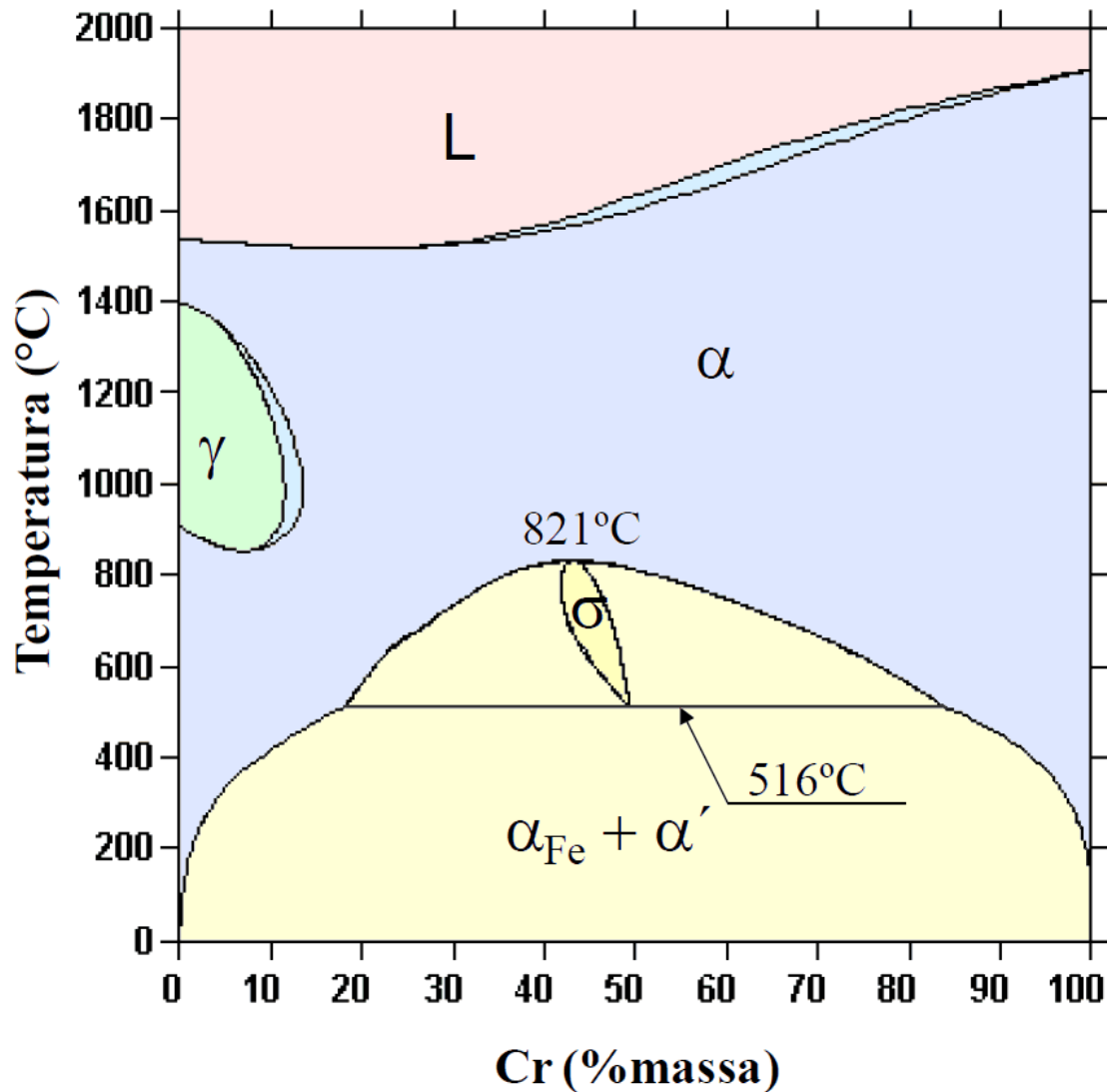


Figura (5) – Diagrama de Equilíbrio Ferro-Cromo (Modenesi, 2014).

Assim, podemos notar que ligas Fe-Cr com mais de 12% de cromo não mostram nenhuma transformação γ - α . Isto impossibilita qualquer refino de grão por transformação de fase e, também, a possibilidade de endurecimento por formação de martensita.

Por causa deste efeito, o Cromo é considerado alfacênico. Ferrita (δ) e ferrita (α) possuem estrutura cristalina do mesmo tipo sendo esta uma rede (CCC) cúbica de corpo centrado. A ferrita formada durante a solidificação e em outros forma de processamento que envolvem fusão e solidificação em soldagem de ligas austeníticas, é chamada de ferrita delta (δ).

A fase sigma σ com um alto teor de cromo inicia sua precipitação nas ligas ferríticas Fe-Cr aproximadamente a 820°C; ela possui próximo de 45%Cr e representa um composto intermetálico de ferro e cromo e sua precipitação pode causar forte fragilização. Seu reticulado cristalino tem um arranjo alternado em um átomo de

ferro e um átomo de cromo. Ocorre um efeito prejudicial na resistência a corrosão devido a fase sigma precipitada, pois esta pode levar a um empobrecimento de cromo no contorno de grão.

Abaixo de aproximadamente 600°C, pode ocorrer a separação do material em uma ferrita α rica em ferro (ferromagnética) e ferrita α' rica em cromo (paramagnética) com 80% de cromo. Esta separação tende a não ser detectável por microscopia óptica. A linha pontilhada na figura (6) representa a transição de comportamento magnético.

Quando se tem a formação de ferrita delta com a precipitação de fase alfa linha, a chamada fragilização a 475°C dos aços inoxidáveis pode ser causada.

A figura (6) mostra o diagrama de equilíbrio Fe-Ni. O níquel tem uma forte tendência em direção a formação de austenita (fase γ), ou seja, de 5% de Ni em diante, o fundido se solidifica mais como cristais δ e sim como cristais γ .

A formação de ferrita durante a solidificação é limitada a um pequeno canto de ferrita δ à esquerda e acima na figura (6); com esta ferrita voltando a ser austenita quando o material resfria em uma faixa de temperaturas entre 1400°C e cerca de 1500°C dependendo do teor de níquel. Em 1514 °C ocorre uma reação peritética em que o metal líquido reage com a ferrita para formar austenita.

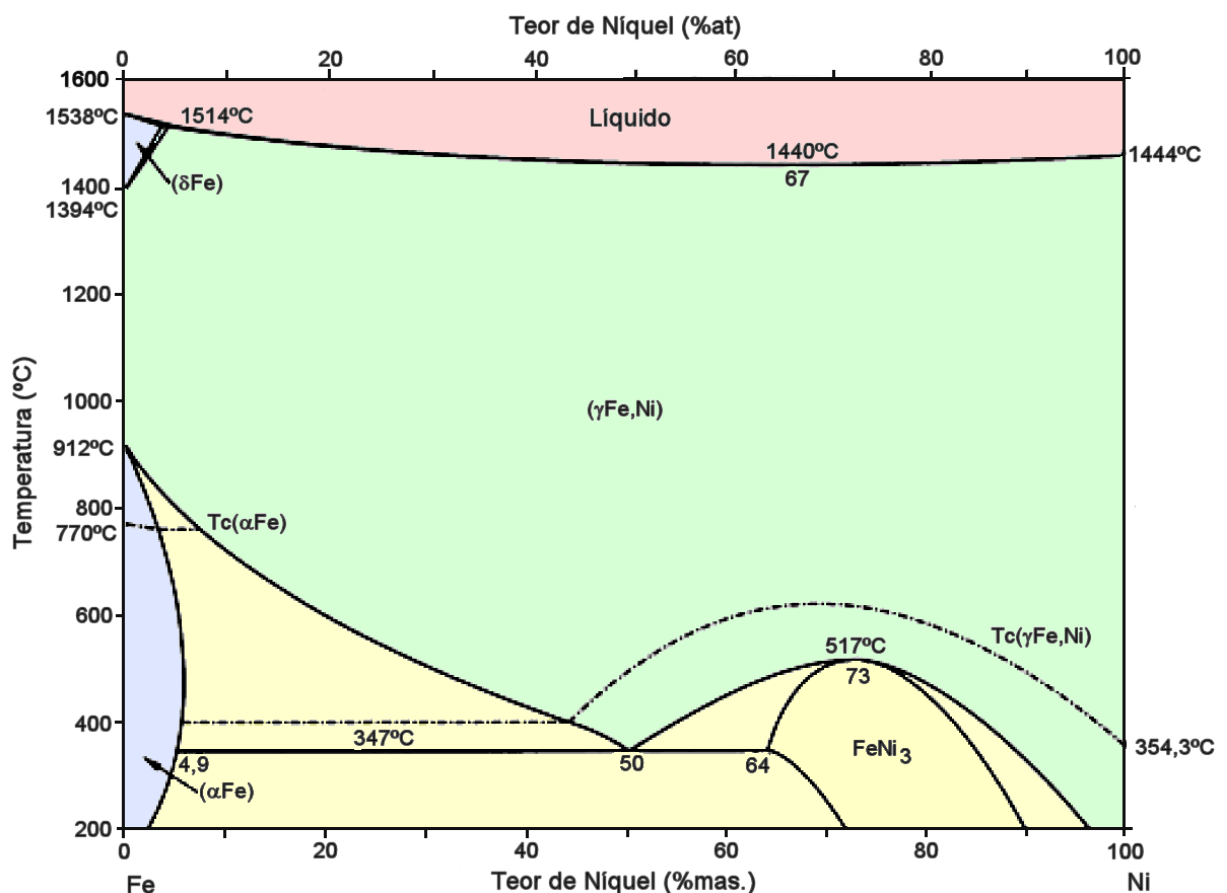


Figura (6) – Diagrama de equilíbrio Ferro- Níquel (Modenesi, 2014) .

O níquel expande substancialmente o intervalo de existência da austenita. Com um aumento do teor de níquel, a área de transformação γ - α se desloca para temperaturas menores, de aproximadamente de 900°C para 350°C. A austenita é estabilizada de tal modo que qualquer queda de temperatura mesmo que seja de 1°C desestabiliza-a, buscando sempre se igualar à temperatura ambiente, com taxas rápidas de resfriamento.

Os aços austeníticos ao cromo e níquel são baseados neste efeito, de modo que a classe destes aços, não atinge dureza elevada, tendo em vista que a transformação γ - α não ocorre em sua totalidade. Com o auxílio de um ímã, as estruturas austeníticas são facilmente distinguidas dos aços ferríticos por não serem magnéticas.

2.4.1 Diagramas Ternário Fe-Cr-Ni

Os Aços inoxidáveis austeníticos são ligas do sistema ternário Fe-Cr-Ni, a figura (7) mostra um diagrama ternário (Fe-Cr-Ni) em corte isotérmico a temperatura de 900 °C.

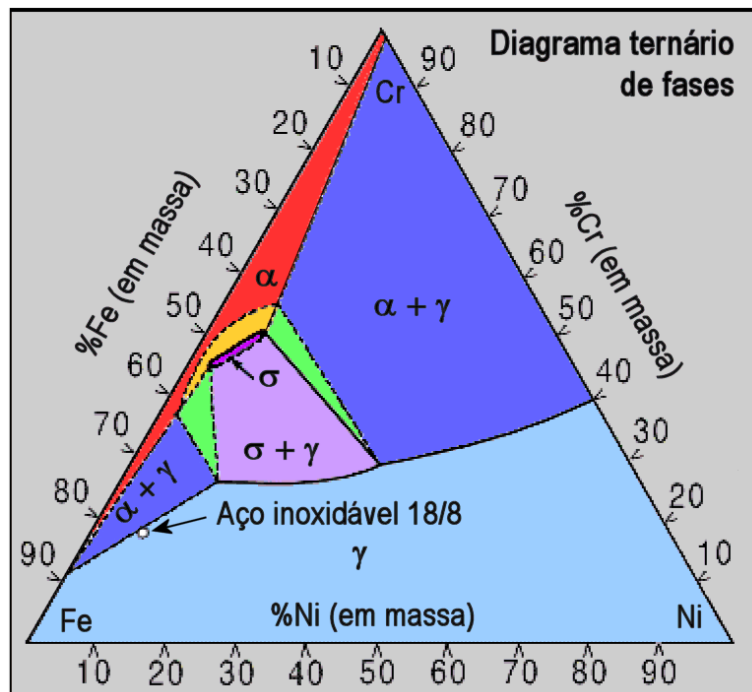


Figura (7) – Sistema ternário Fe-Cr-Ni (Modenesi, 2014).

Essa classe de aços apresenta teor mínimo de 16% de cromo, 8% de níquel

e um teor de carbono, em geral, compreendido entre 0,02% a 0,15%.

Para compreender melhor a influência desses elementos anteriormente citados na estrutura do aço inoxidável austenítico é mostrada uma seção vertical do diagrama ternário Fe-Cr-Ni na figura (8).

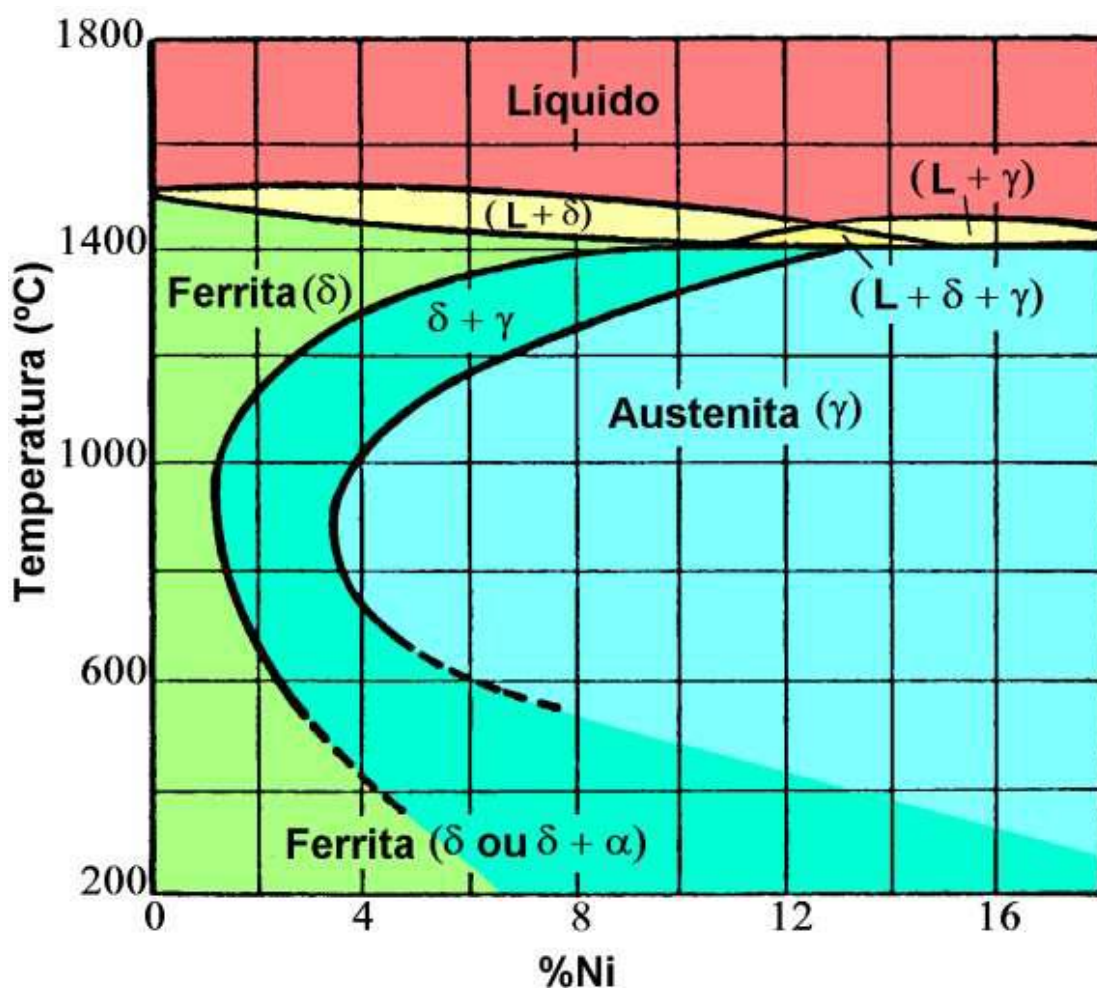


Figura (8) - Seção vertical para 18% de Cr do diagrama ternário Fe-Cr-Ni para teores de carbono inferiores a 0,03% (Modenesi, 2014).

Aços inoxidáveis com composições inferiores a 1% ou 1,5% de níquel apresentam microestrutura ferrítica entre a temperatura ambiente e o início da fusão conforme apresentado na figura (9). O aço apresenta estrutura bifásica (austenita e ferrita) que aumenta progressivamente com o aumento do teor de Ni, para percentuais entre 2% e 3,5% de níquel.

Ocorre a presença completa da estrutura austenítica a alta temperatura para teores superiores a 3,7% de Ni. O intervalo de existência da austenita aumenta gradativamente

com a elevação dos teores de Ni, enquanto a temperatura de início da formação de martensita é reduzida. Contudo, para teores de Ni acima de 8% obtém-se a estrutura austenítica a temperatura ambiente, obtendo-se aços inoxidáveis austeníticos que são ligas contendo teores acima de 18% de cromo e 8% de níquel.

Podem ser adicionados outros elementos de liga, além do Cr e Ni, para melhorar as propriedades mecânicas do aço. Os aços inoxidáveis austeníticos possuem baixo limite de escoamento em comparação aos martensíticos, não é ferromagnético, apresentam elevada ductilidade e boa soldabilidade.

Os aços inoxidáveis austeníticos não podem ser endurecidos por tratamento térmico, mas sua resistência à tração e dureza pode ser aumentada por encruamento. Os aços inoxidáveis austeníticos são muito empregados em equipamentos, estruturas e tubulações para diversas indústrias, principalmente a petroquímica.

Este grupo de aços é o mais utilizado, representando cerca de 65% a 70% do total em uso. Esta posição dominante é função do alto nível de fabricabilidade, resistência à corrosão e uma grande variedade na combinação de propriedades que podem ser obtidas por diferentes composições, fornecendo uma boa escolha do material para um grande número de aplicações como mostra a figura (9).

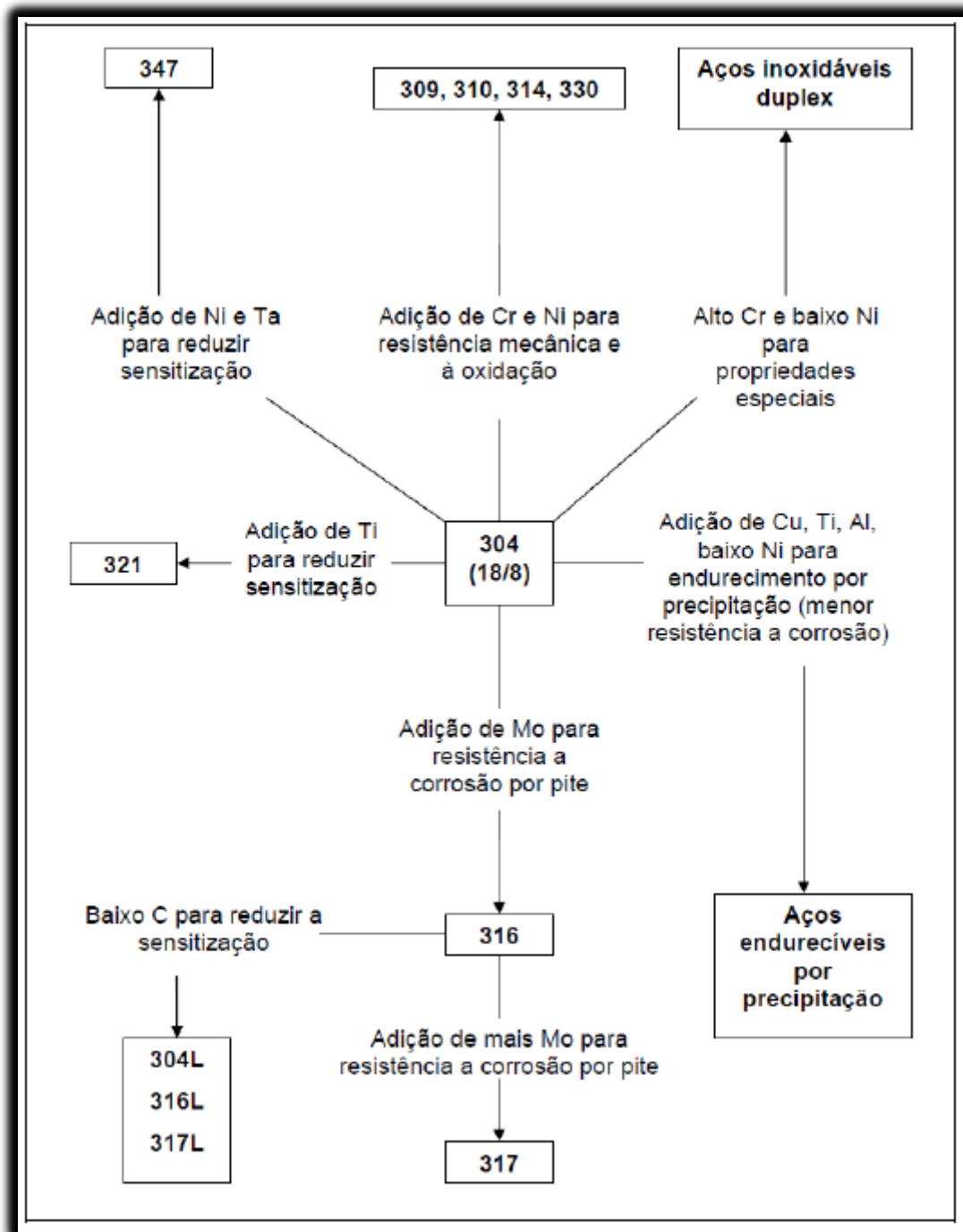


Figura (9) - Classificação dos aços inoxidáveis para diferentes composições (Elias, 2013).

2.4.2 Estrutura da Zona Fundida

A microestrutura final da ZF de um aço inoxidável austenítico dependerá da forma de solidificação do aço e das transformações subsequentes no estado sólido. Esta microestrutura pode ser classificada de acordo com a morfologia da ferrita. As

principais microestruturas encontradas, para valores crescentes da relação Cr/Ni, são mostradas na figura (10) e descritas a seguir:

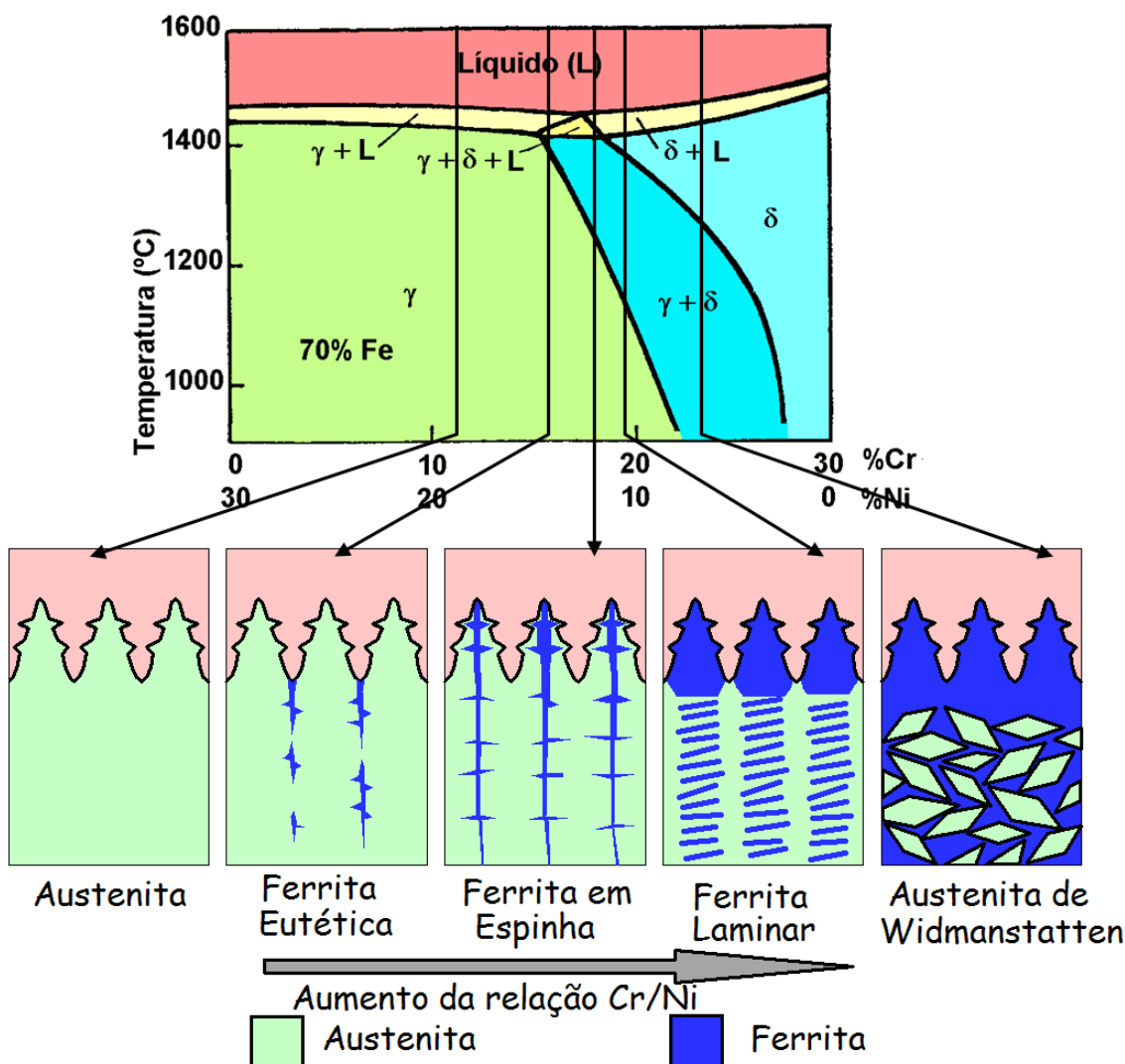


Figura (10) – Exemplo de morfologia da ferrita δ na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos (Modenesi, 2014).

Austenita (A): Solidificação direta para austenita sem formação de ferrita.

Austenita + ferrita eutética (AF): Solidificação em austenita primária com formação de ferrita ao final da solidificação.

Austenita + ferrita em espinha ou vermicular (FA): Solidificação em ferrita primária com formação de austenita tanto nas etapas finais desta e no estado sólido.

Austenita + ferrita laminar ou rendilhada (FA): Solidificação em ferrita primária com a sua transformação em austenita principalmente no estado sólido.

Ferrita + austenita de Widmanstätten (F): Solidificação ocorre somente como ferrita. A austenita é formada na matriz de ferrita já solidificada.

2.5 – Diagramas Constitucionais Empíricos

A estrutura de solda não depende somente da velocidade de resfriamento e da razão Cr/Ni. Em particular, os outros elementos de liga adicionados ao aço também afetam a estabilidade relativa das fases. Para classificar o efeito destes elementos, estes foram divididos em formadores de ferrita (por exemplo, Cr, Mo, Si, Nb e Al) e de austenita (por exemplo, Ni, C, N e Mn). O seu efeito relativo na formação de uma fase ou outra é, em geral, expresso em termos de equivalência de cromo e equivalência de níquel e a sua influencia combinada pode ser apresentada em diagramas constitucionais empíricos. Em especial, neste trabalho, iremos tratar somente do diagrama de Schaeffler.

2.5.1 O Diagrama de Schaeffler

O diagrama de Schaeffler em soldagem é importante a avaliação da microestrutura e o consequente conhecimento das propriedades de um depósito de solda de aços inoxidáveis ou ligas Fe-Cr, Fe-Ni, Fe-Cr-Ni.

2.5.2 A Importância do Diagrama de Schaeffler

Esse diagrama auxilia na escolha do eletrodo adequado para a execução da soldagem, bem como previsão e prevenção dos problemas que podem ocorrer, determinando também, em consequência, os tratamentos térmicos necessários, anteriores ou posteriores à soldagem.

2.5.3 Avaliação do Depósito de Solda

O diagrama de Schaeffler é o principal instrumento para avaliação do depósito de solda.

Permite conhecer com antecedência a composição química da estrutura de uma solda, principalmente, de aço ferrítico x de baixa liga e aço carbono ou CMn x aço inoxidável.

2.5.4 A Construção do Diagrama de Schaeffler

Segundo Elias (2013), Schaeffler utilizou para a confecção de seu diagrama eletrodos revestidos de 4,7 mm de diâmetro e diferentes composições de cromo e níquel, sempre nos mesmos valores de tensão e corrente, e conseqüentemente, mesma energia de soldagem. O método foi depositar cordões simples e sem diluição, determinando a estrutura e a composição desse metal depositado.

2.5.5 Os Constituintes Encontrados por Schaeffler

Os seguintes constituintes são encontrados no diagrama de Schaeffler:

- *Austenita*: estrutura CFC, de grãos colunares, de grande tenacidade, mas sujeita à trincas e fissuração a quente.
- *Ferrita*: Estrutura CCC de grão colunar e tendência a apresentar baixa tenacidade. Pode ser encontrada também encontrada também a estrutura em conjunto com a austenita. A ferrita se forma primeiro e limita o crescimento do grão da austenita.
- *Martensita*: Estrutura dura e pouco tenaz (de acordo principalmente com o teor de carbono), sujeita a trincas a frio. Pode ser encontrada isolada ou em conjunto com austenita e / ou ferrita.

2.5.6 Eixos do Diagrama

Schaeffler colocou em um sistema de coordenadas onde os eixos representam o efeito dos elementos alfa-gêneos e gama-gêneos, colocou os pontos encontrados com as respectivas estruturas à temperatura ambiente. Segue o diagrama de Schaeffler conforme figura (11):

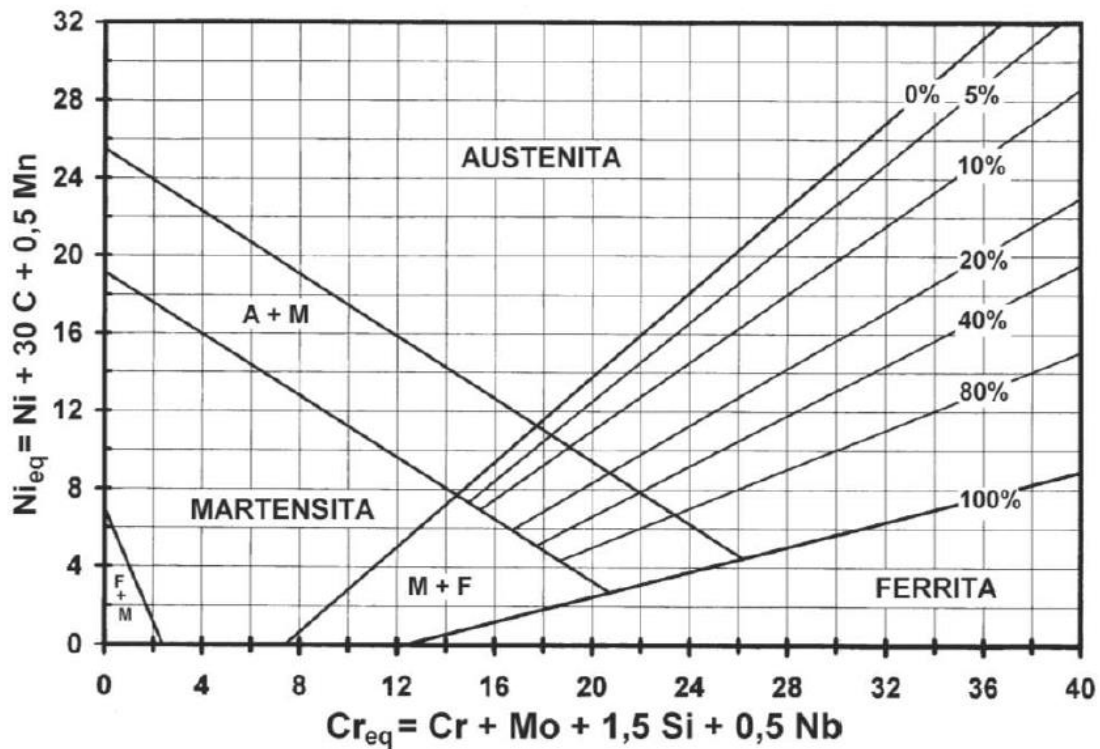


Figura (11) – Diagrama de Schaeffler (Modenesi, 2014).

2.5.7 Os Elementos Presentes

Schaeffler descobriu também que outros elementos agiam como o cromo e o níquel, em maior ou menor intensidade. Seu próximo trabalho foi pesquisar a influência de cada um, verificando que podiam se encaixar em um das duas categorias: alfa-gêneos ou gama-gêneos.

2.5.8 Elementos Gamagênicos

Consideram-se como Gamagênicos os seguintes elementos:

- Níquel: é o gamagênico principal, isto é, sua adição amplia a faixa de estabilidade da austenita. É um elemento endurecedor por solução sólida. Também pode auxiliar na formação da camada passiva (óxido de Cr-Ni) aumentando a resistência à corrosão e ao calor;
- Carbono: usado em pequenas percentagens, raramente ultrapassa 0,30% e atualmente pode comumente ficar a menos de 0,03%. A adição de C está relacionada com o tipo de aço inoxidável. Nos aços martensíticos, a adição visa aumentar a dureza da martensita e a precipitação de carbonetos aumentando dessa maneira a resistência mecânica e ao desgaste. Nos aços austeníticos e ferríticos, o teor de C é limitado devido ao fenômeno de sensitização e corrosão intergranular;
- Nitrogênio: em teores maiores que 0,07%, o nitrogênio pode ser considerado como elemento de liga que tem efeito análogo ao do carbono. Melhora a ductilidade (para teores de 0,5% a 1%) e a dureza (para teores de 0,3% a 0,4%). Estabiliza a austenita podendo ser empregado como um substituto de níquel, sem o inconveniente da precipitação de carbonetos que o carbono oferece.
- Manganês: pode substituir uma parcela considerável de níquel para conseguir, a temperatura ambiente, manter a estrutura austenítica. Em teores maiores que 6% (alguns autores dizem 4%) pode se comportar como alfa-gênico, exigindo um maior teor de níquel para contrabalançar seu efeito.

2.5.9 Elementos Alfa-gênicos

Consideram-se como alfa-gênicos os seguintes elementos:

- Cromo: é o principal e é o termo de comparação dos demais elementos alfa-gênicos. É o elemento responsável pela formação da camada passiva na superfície. Além da resistência à corrosão, o Cr é um elemento “alfa-gênico”, isto é, amplia a faixa de estabilidade da ferrita. As adições de Cr têm influência significativa nas propriedades mecânicas promovendo o endurecimento por solução sólida.
- Silício: possui uma influência 50% maior (coeficiente de 1,5), que o cromo, até o teor de 1%. Pode ser utilizado como elemento de liga nos aços refratários, ou para melhorar a resistência dos aços 18-10 (18%Cr e 10%Ni), em certos casos de

corrosão sob tensão.

- Molibdênio: Aumenta a estabilidade da camada passiva e a resistência à corrosão em ácido sulfúrico e na água do mar com conseqüente resistência a corrosão por pite. Sua influência é aproximadamente a mesma do cromo (fator 1,0).
- Tungstênio: melhora a resistência mecânica a temperaturas elevadas.
- Nióbio-Titânio: usados em teores bem pequenos, são alfacênicos e contribuem para fixar o carbono, evitando a corrosão intergranular.

2.5.10 Conceito de Níquel Equivalente

Conceitua-se, como níquel equivalente, a soma dos teores de níquel e dos elementos gamagênicos, multiplicados pelo fator que expressa sua influência relativamente ao níquel. Assim o teor de níquel equivalente pode ser expresso por:

$$NIEQ = \%Ni + 30X\%C + 0,5X\%Mn$$

2.5.11 Conceito de Cromo Equivalente

Analogamente o cromo equivalente será a soma ponderada dos elementos alfacênicos:

$$CREQ = \%Cr + \%Mo + 1,5X\%Si + 0,5X\%Nb$$

2.5.12 A Quantidade de Ferrita

Deve-se observar que o diagrama de Schaeffler não leva em consideração a velocidade de resfriamento. Assim, este diagrama fornece apenas o valor estimado da quantidade de ferrita da solda. Entretanto, na soldagem com eletrodos revestidos, as diferenças devidas a velocidades de resfriamento podem ser ignoradas para a maioria das aplicações.

2.5.13 Aplicações do Diagrama Schaeffler

O diagrama de Schaeffler pode ser empregado na escolha do processo adequado de soldagem, bem como na previsão de problemas que podem ocorrer na junção dissimilar.

Tal diagrama é uma forma rápida para a previsão da estrutura resultante de uma soldagem; pode-se conhecer as propriedades de uma junta dissimilar, principalmente em aços inoxidáveis. O diagrama permite prever, a partir da composição química, a microestrutura de uma solda e escolher os eletrodos apropriados para cada soldagem. O diagrama é utilizado, principalmente, para soldagem de aço ferrítico x baixa liga e aço-carbono ou CMn x aço inoxidável.

A utilização do diagrama de Schaeffler é simples; sobre o diagrama, pode-se demarcar regiões de problemas característicos. As composições químicas das soldagens que caírem dentro dessas regiões mostradas na figura (12), tendem a apresentar os problemas caracterizados. Assim, ao se executar a soldagem deve-se levar em conta primeiramente a prevenção contra o problema indicado abaixo:

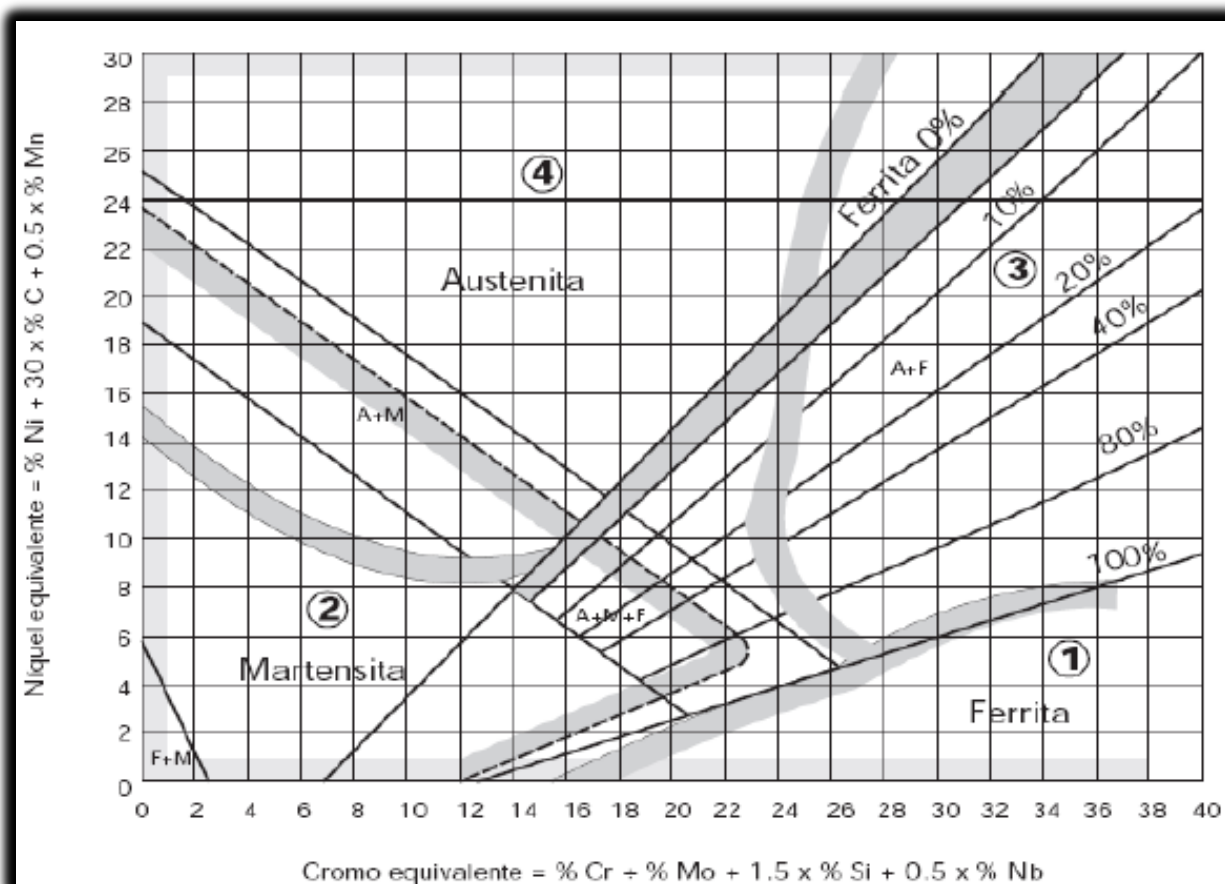


Figura (12) – Regiões problemáticas típicas da soldagem de aços inoxidáveis (Elias, 2013).

Região 1 – Zona de crescimento de grão

Abrange geralmente a região dos aços inoxidáveis ferríticos, ao cromo e com baixo teor de carbono; o problema é o crescimento irreversível dos grãos, quando o aço está aquecido a temperaturas maiores que 1150°C.

Esse crescimento irreversível dos grãos é mais acentuado na zona termicamente afetada, resultando em fragilização. Normalmente não resiste sequer aos esforços de contração próprios da soldagem.

Por essa razão, procurava-se evitar a soldagem desses aços, especificandose outro tipo que, embora mais caro, evite tais riscos. O uso mais generalizado desses aços é na soldagem de revestimento de chapas (“clad”), muito comum na indústria petrolífera e petroquímica, porque a fragilidade do revestimento é, em parte, compensada pela ductilidade da chapa base.

Região 2 – Zona de fissuração a frio

Esse campo abrange as estruturas martensíticas e parte das estruturas mistas martensíticas-austeníticas e martensíticas-ferríticas. São normalmente os aços temperados ou temperados e revenidos, com teores mais altos de carbono (ex: 0,3%) e os revestimentos duros que são os problemas desse campo.

A fissuração a frio (abaixo de 400°C) ocorre nesses aços devido à coexistência desses três fatores: estrutura metalúrgica martensítica, tensões e hidrogênio.

A fissuração normalmente se localiza na zona termicamente afetada da junta soldada, mas pode também ocorrer no cordão de solda.

Região 3 – Zona da Fase Sigma

Este campo engloba todas as composições de ligas que têm possibilidade de, após longo tempo de permanência a temperaturas na faixa de 500-900°C, fazer surgir uma fase chamada fase sigma, basicamente Fe-Cr, que tem como principal característica, uma fragilidade elevada a temperatura ambiente. A fase sigma sendo formada basicamente de ferro e cromo, tem mais facilidade de se desenvolver a

partir da ferrita. Entretanto também pode ser formada na austenita. Sendo a proporção na fase de aproximadamente um átomo de ferro para um átomo de cromo, era de se esperar que só ligas de alta percentagem de cromo fossem susceptíveis. Porém, devido a possibilidade de difusão, aliada ao fato de haver regiões microsegregadas de composições químicas diversas, há ocorrência de fase sigma em ligas com até 20% de cromo, austeníticas ou ferríticas.

Região 4 – Zona de fissuração a quente

O campo engloba basicamente as composições austeníticas. O problema que pode ocorrer nas soldagens de ligas cuja composição esteja nesse campo é a fissuração a quente. Ocorre em temperaturas acima de 1250°C. a explicação desse fenômeno é que, nessas ligas, há possibilidade de formação de fases segregadas, de menor resistência mecânica. Esse fato, aliado a tensões de contração oriundas de uma soldagem, é suficiente para fissurar a solda em temperaturas ainda elevadas. Ocorre basicamente no cordão fundido, embora possa ocorrer na ZTA.

Região central – Isenta de problemas

No centro do diagrama há a ocorrência de uma mistura de A + F + M. As composições químicas que estiverem nessa região estarão praticamente livres dos quatro problemas das regiões de 1 a 4.

O objetivo do metalurgista é fazer seus cálculos com a composição química da zona fundida, ou seja, a participação dos metais de base e adição com suas respectivas diluições a fim de que fiquem dentro da região.

Outra forma de uso do diagrama de Schaeffler é a determinação da porcentagem de ferrita na solda, chamada número de ferrita (FN). Como a ferrita é magnética, pode ser medida pelo campo magnético produzido; a intensidade pode ser comparada a aparelhos calibrados em corpos de prova-padrão, obtendo-se assim a quantidade de ferrita de uma solda.

O aços inoxidáveis austeníticos CrNi, sem fase ferrítica, são propensos à fissuração a quente. Procuram-se sempre soldas contendo de 4% a 10% de ferrita, conferindo maior resistência a trincas a quente.

2.6 – Aspectos Metalúrgicos na Soldagem de Revestimento

Todos os aços austeníticos são relativamente simples de soldar, com exceção dos aços com adição de enxofre para usinagem fácil. Os aços austeníticos apresentam coeficiente de expansão térmica maior (cerca de 45%), maior resistência elétrica e menor condutividade térmica que os aços doces. Nos aços com teor de carbono superior a 0,06%, carbonetos podem ser precipitados nos contornos de grão da ZTA, durante o ciclo térmico de soldagem, prejudicando a resistência à corrosão. Para minimizar este problema e, também, problemas de distorção, recomenda-se soldar estes aços com uma maior velocidade de deslocamento. Devido à menor temperatura de fusão destes aços e sua menor condução de calor, a corrente de soldagem é usualmente menor que a usada em aços doces. Um maior coeficiente de expansão térmica torna maior a tendência à distorção na soldagem destes aços e levam à necessidade da adoção de técnicas para a sua redução. Para chapas finas, dispositivos de fixação e um ponteamto cuidadoso são, em geral, uma necessidade. Dependendo de sua composição química (maior quantidade de elementos gamagênicos), o metal de solda pode solidificar-se com uma estrutura completamente austenítica. Nestas condições, a solda é muito sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação. Este problema é minimizado pela seleção de metal de adição que possibilite uma estrutura austeno-ferrítica na solidificação e resulte em cerca de 4 a 10% de ferrita na solda à temperatura ambiente. Nos casos em que a seleção de um consumível deste tipo não seja possível, isto é, havendo a necessidade de uma estrutura completamente austenítica na solda (em ambientes altamente corrosivos ou em aplicações criogênicas, por exemplo), eletrodos com baixos teores de enxofre e fósforo e elevada relação Mn/S devem ser usados junto com um procedimento de soldagem que minimize o nível de tensões na solda.

Em metais de solda inoxidáveis é possível obter-se uma microestrutura bifásica a qual é constituída por austenita e ferrita δ . O teor e morfologia da ferrita presente no metal de solda depende da composição química e dos parâmetros de soldagem. A variação da quantidade de ferrita δ e de sua morfologia pode ocasionar mudanças nas características mecânico/metalúrgicas do metal de solda.

Vários trabalhos apresentam que a presença de ferrita δ contribui para uma melhor soldabilidade, evitando principalmente problemas de trincas de solidificação

(Hull, F. C., 1967; Arata, et al., 1976; Radhakrishnan, V. M., 2000). Brooks & Thompson (1991), citam que a presença de ferrita δ nos contornos de grãos da austenita atua como barreira ao movimento das trincas. Cieslak et al., (1982), entretanto, verificaram em seu trabalho que o modo de solidificação influencia a suscetibilidade à trincas de solidificação, no qual o modo de solidificação em austenita primária torna o metal de solda mais suscetível à trincas, quando comparado com o modo ferrita primária, devida a uma maior segregação de impurezas para os contornos de grãos.

David (1981), estudando a morfologia da ferrita δ , identificou quatro tipos de morfologias em metais de solda da classe 308, classificando-as como: vermicular, placas (lathy), acicular e globular. Segundo ele, as três primeiras morfologias estão relacionadas com o processo de solidificação e transformações no estado sólido. Já a quarta é obtida devido à instabilidade de qualquer uma das outras três morfologias, associada com efeitos térmicos. Lippold & Savage (1980), estudando o efeito da composição química sobre a morfologia da ferrita δ no metal de solda, definiu quatro regiões no diagrama pseudobinário, onde em cada uma é possível obter morfologias com características distintas. Ele também relata que variações localizadas da composição química da liga e da velocidade de resfriamento ao longo da solidificação, resultando numa microestrutura com morfologia mista.

O principal problema metalúrgico encontrado em soldas de metais dissimilares $\alpha - \gamma$ é a formação, ao longo da interface da linha de fusão, de regiões que podem atingir durezas superiores a 400 HV, ver figura (13), o que indica estarem constituídas de martensita e, portanto, serem frágeis. Estas regiões, com largura de dezenas de micrômetros possuem composições químicas intermediárias entre a do metal de solda e do metal de base, as quais não podem ser previstas através de cálculos usuais de diluição (Bohórquez et al., 2010). Devido a estas características, as ZDE (Zonas de Dureza Excessiva) tornam-se susceptíveis a ataques corrosivos por pitting, fragilização por hidrogênio, corrosão sob tensão podendo resultar em falhas na interface metal de solda e metal de base da estrutura.

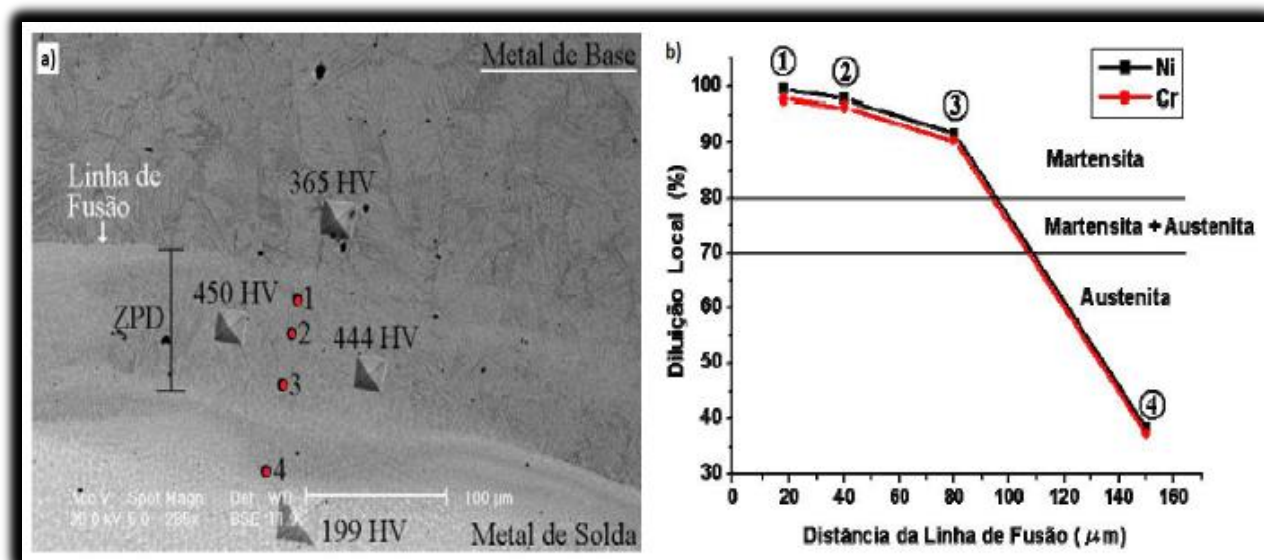


Figura (13) – Problema metalúrgico encontrado em soldas de metais dissimilares $\alpha - \gamma$: a) Formação de zonas parcialmente diluídas na interface da linha de fusão de uma primeira camada revestimento; b) Diluição local calculada em 4 pontos a partir da linha de fusão (Elias, 2013).

Ao se analisar a microestrutura das soldas dissimilares depositadas em diferentes condições de corrente e velocidade de soldagem, verificou que a formação de ZPD (Zona Parcialmente Diluída) ocorre com mais frequência quando utilizadas correntes de soldagem mais altas, mesmo quando empregadas baixas velocidades de soldagem (que tendem de uma forma geral a diminuir a diluição global). Quando utilizadas correntes mais baixas, existe uma redução na formação de ZPD sobre a linha de fusão (Bohórquez et al., 2010).

Portanto, torna-se necessário buscar condições de soldagem que minimizem ou até eliminem estas zonas de dureza excessivas (Silva et al., 2010). Quanto menor a diluição, menor a probabilidade de formação de microestruturas frágeis e susceptíveis a corrosão.

2.7 – Fatores de Processo da Soldagem de Revestimento

Existe uma aplicação muito comum na indústria de petróleo e gás o revestimento de substrato de aço carbono com aço inoxidável. Os motivos para esta grande utilização incluem do lado dos aços carbono e C-Mn de grau estrutural, o seu menor custo em relação aos aços inoxidável austenítico, aliado a uma maior resistência mecânica, principalmente em relação ao limite de

escoamento e, do lado dos aços inoxidáveis, a sua resistência à corrosão muito superior e necessária em aplicações em que um meio agressivo esteja em contato com alguma parte do equipamento. Portanto os requisitos básicos de projeto em geral para esse tipo de revestimento inoxidável são:

- a) Boa resistência à corrosão.
- b) Não pode haver surgimento de trincas de solidificação.
- c) Boa soldabilidade e um adequado procedimento de soldagem.
- d) Dureza necessária no metal de solda final.
- e) Composição química mínima necessária no metal de solda final.

É bem conhecido que na soldagem de revestimento de aço carbono com aço inoxidável austeno-ferríticas, os maiores problemas encontrados estão na diluição do metal de solda, pois átomos de carbono migram próximos à linha de fusão formando uma zona de transição martensítica através da linha de fusão entre o metal de solda e o aço ferrítico, com diferentes coeficientes de expansão térmica.

Os problemas de diluição e migração de carbono na soldagem de revestimento dissimilar martensítica-austenítica não são tão severos como no revestimento dissimilar austeno-ferrítica, devido à menor diferença relativa de composição química que há entre estes tipos de revestimentos. Entretanto, trincas a frio nos aços martensíticos e trincas a quente nos aços austeníticos podem ocorrer por causa das características especiais destes tipos de aço. A utilização de metal de adição no metal de base no processo de revestimento, requer um estudo no diagrama de Schaeffler, pois, dependendo da escolha do consumível, pode vir a cair em regiões que afetarão a soldabilidade e por conseqüência, a qualidade do revestimento inox. Todos esses fatores necessitam ser avaliados antes da utilização em aplicações industriais.

2.7.1 Energia de Soldagem

Durante a soldagem, a variação de parâmetros tais como, intensidade de corrente, tensão e velocidade de soldagem, tem forte influência nas características da solda. Estes parâmetros determinam a energia envolvida no processo. Como em situações práticas, nem sempre é possível medir a energia fornecida durante a execução da solda, é possível estimar seu valor conforme a equação abaixo. A energia fornecida pelo arco por unidade de comprimento de solda é conhecida por energia nominal:

$$E_n = \frac{U \times I}{v_s}$$

Onde: E_n é a energia nominal de soldagem (J/mm)

U é a tensão do arco (V)

I é a corrente de soldagem (A)

v_s é a velocidade de soldagem (mm/s)

Somente uma parcela da energia do arco é efetivamente transferida para a solda, pois grande parte da energia acaba servindo simplesmente para aquecer o eletrodo, ocorrendo também perdas de calor para o ambiente. Para calcular a energia líquida, ou seja, a energia absorvida efetivamente pela peça, é necessário utilizar a seguinte relação dada pela equação abaixo:

$$E = r \times E_n$$

Onde: E é a energia de soldagem (J/mm)

r é o rendimento térmico do processo de soldagem

E_n é a energia nominal de soldagem

Características do processo e condições de soldagem conforme diferentes intensidades de energia que é transferida para a junta, a eficiência térmica da fonte

de calor é uma particularidade de cada processo. Para o processo a arco elétrico com eletrodo revestido, admite valores para rendimento térmico entre 0,66 a 0,85. O valor de 0,75 é habitualmente usado nos cálculos de aporte térmico em soldagens por eletrodo revestido.

A energia de soldagem tem impacto direto nas propriedades da solda, de forma que seu controle é fundamental para se obter soldas com as características desejáveis. A figura (14) ilustra a forte dependência do aporte térmico com o cordão de solda, no caso mostrado, a eficiência de fusão.

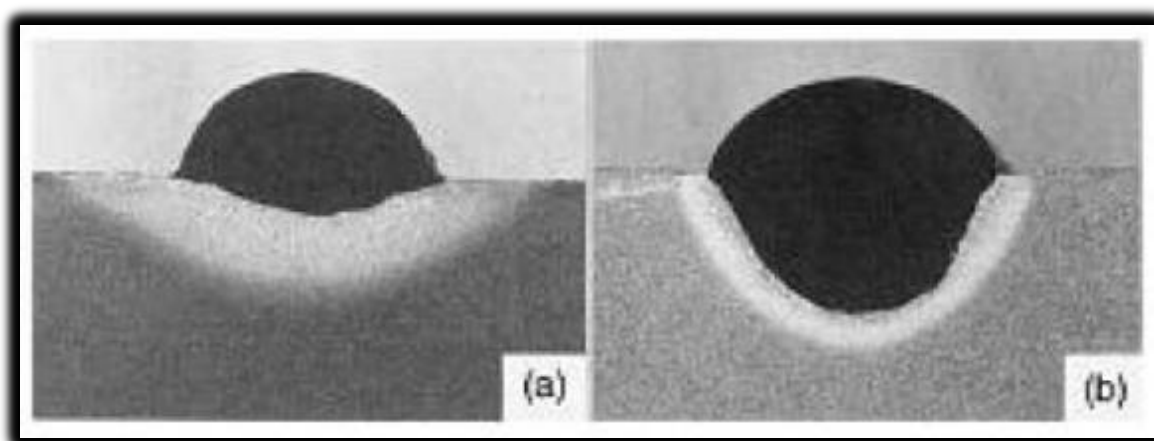


Figura (14) – Eficiência de fusão. a) Baixa energia e baixa velocidade de soldagem. b) Alta energia e alta velocidade de Soldagem (Elias, 2013).

3 - Materiais e Métodos

3.1 Material de base

Como material de base a ser revestido, foi usada uma chapa de aço ASTM A-36 na espessura de 16 mm. Foram removidos todos resíduos das superfícies onde seriam realizadas as soldas (Figura 15).



Figura (15) – Material de base – chapa ASTM A-36.

A Figura 16 mostra a composição química do ASTM A-36 :

Grau	Espessura (mm)	Composição Química %					
		C	Mn	Si	P	S	Outros
A36	6,00 ~ 19,05	0,25 máx.	-	0,4 máx.	0,04 máx.	0,050 máx.	Cu 0,20 mín.**
	19,06 ~ 38,10		0,80 ~ 1,20				
	38,11 ~ 63,50	0,26 máx.	0,15 ~ 0,40				
	63,51 ~ 101,60	0,27 máx.		0,85 ~ 1,20			

Figura (16) – Composição química ASTM A-36.

3.2 Metais de Adição

Os metais de adição avaliados foram, segundo norma AWS 5.4, os eletrodos 308L-17, 309L-17, 312-17 e 316L-17, todos no diâmetro de 2,5mm. As figuras 17 a 20 mostram as informações técnicas de cada consumível:

E 308L-17

COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA – Conforme AWS A5.4/5.4M									
	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%
AWS 5.4 - Min.	0,00	18,00	9,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
AWS 5.4 - Máx.	0,04	21,00	11,00	0,75	2,50	1,00	0,04	0,03	0,75
Típico	0,02	19,24	10,16	0,14	0,75	0,75	0,03	0,02	0,02

PROPRIEDADE MECÂNICA TÍPICA – Conforme AWS A5.4/5.4M			
Requisitos Unidade	Limite de Resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Min	550	n/a	35
Max	n/a	n/a	n/a
Típico	623	460	42

TEOR DE FERRITA CALCULADO PELO WRC 92 E MEDIDO POR FERRITOSCÓPIO.	
Teor de Ferrita	Especificado
Típico 8,0	3,0 – 9,0

PARÂMETROS		
Diâmetro do Eletrodo (mm)	Comprimento (mm)	Corrente (Amperes)
2,0	250	30 – 50
2,5	300	40 – 75
3,2	350	60 – 110
4,0	350	80 – 150
5,0	350	140 – 210

Figura (17) – Composição química eletrodo E308-17

E 309L-17

COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA – Conforme AWS A5.4/5.4M									
	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%
AWS 5.4 - Min.	0,00	22,00	12,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
AWS 5.4 - Máx.	0,04	25,00	14,00	0,75	2,50	1,00	0,04	0,03	0,00
Típico	0,03	23,25	12,98	0,03	0,66	0,81	0,03	0,02	0,75

PROPRIEDADE MECÂNICA TÍPICA – Conforme AWS A5.4/5.4M			
Requisitos Unidade	Limite de Resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Min	520	n/a	33
Max	n/a	n/a	n/a
Típico	632	460	36

TEOR DE FERRITA CALCULADO PELO WRC 92 E MEDIDO POR FERRITOSCÓPIO.	
Teor de Ferrita	Especificado
Típico 10,0	7,5 - 12

PARÂMETROS		
Diâmetro do Eletrodo (mm)	Comprimento (mm)	Corrente (Amperes)
2,0	250	30 – 50
2,5	300	40 – 75
3,2	350	60 – 110
4,0	350	80 – 150
5,0	350	140 – 210

Figura (18) – Composição química eletrodo E309L-17

E 312L-17

COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA – Conforme AWS A5.4/5.4M									
	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%
AWS 5.4 - Min.	0,00	28,00	8,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
AWS 5.4 - Máx.	0,15	32,00	10,5	0,75	2,50	1,00	0,04	0,03	0,75
Típico	0,03	30,41	8,89	0,11	1,09	0,87	0,03	0,02	0,10

PROPRIEDADE MECÂNICA TÍPICA – Conforme AWS A5.4/5.4M			
Requisitos Unidade	Limite de Resistencia (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Min	660	n/a	22
Max	n/a	n/a	n/a
Típico	750	730	Indisponível

TEOR DE FERRITA CALCULADO PELO WRC 92 E MEDIDO POR FERRITOSCÓPIO.	
Teor de Ferrita	Especificado
Típico: Indisponível	n/a

PARÂMETROS		
Diâmetro do Eletrodo (mm)	Comprimento (mm)	Corrente (Amperes)
2,0	250	30 – 50
2,5	300	40 – 75
3,2	350	60 – 110
4,0	350	80 – 150
5,0	350	140 – 210

Figura (19) – Composição química eletrodo E312L-17

E 316L-17

COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA – Conforme AWS A5.4/5.4M									
	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%
AWS 5.4 - Min.	0,00	17,00	11,00	2,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
AWS 5.4 - Máx.	0,04	20,00	14,00	3,00	2,50	1,00	0,04	0,03	0,75
Típico	0,02	18,47	11,77	2,05	0,79	0,74	0,03	0,02	0,06

PROPRIEDADE MECÂNICA TÍPICA – Conforme AWS A5.4/5.4M			
Requisitos Unidade	Limite de Resistencia (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Min	490	n/a	30
Max	n/a	n/a	n/a
Típico	639	485	37

TEOR DE FERRITA CALCULADO PELO WRC 92 E MEDIDO POR FERRITOSCÓPIO.	
Teor de Ferrita	Especificado
Típico 4,0	3,0 – 9,0

PARÂMETROS		
Diâmetro do Eletrodo (mm)	Comprimento (mm)	Corrente (Amperes)
2,0	250	30 – 50
2,5	300	40 – 75
3,2	350	60 – 110
4,0	350	80 – 150
5,0	350	140 – 210

Figura (20) – Composição química eletrodo E316L-17

3.3 Processo e Equipamento

Foi empregado o processo de soldagem por eletrodo revestido, SMAW conforme designação AWS.

O equipamento utilizado foi uma inversora de solda modelo ZX7 200 do fabricante Weld Vision (figuras 21 e 22).



Figura (21) - Equipamento de soldagem utilizado.

Especificações Técnicas:	
Alimentação	Monofásica/bifásica – 50/60 hz
Tensão de entrada	220V
Potência na corrente máxima	7,2Kva
Grau de proteção	IP21S
Grau de isolamento	F
Ciclo de trabalho	80% a 200A; 100% a 155A
Ajuste de corrente	10A a 200A
Eletrodo Utilizado	1,6 a 4 mm AWS7018
Corrente de saída máxima	200A
Modo de refrigeração	Ventilação forçada
Dimensões	490 x 280 x 375mm
Peso	9Kg

Figura (22) – Especificações técnicas da inversora ZX7 200.

3.4 - Os Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros de soldagem foram os mesmos para todos consumíveis, e estão mostrados na tabela 1:

Parâmetros	Valor
Energia de soldagem (J/mm)	424
Tipo de corrente	CC+
Corrente (A)	85
Tensão (V)	24
Velocidade de soldagem (mm/s)	~ 4,3
Rendimento térmico do processo ®	0,7 – 0,9

Tabela (1) – Parâmetros de Soldagem

3.5 - Os Corpos de Prova

O revestimento em aço inox foi feito em duas camadas a fim de garantir uma espessura mínima de revestimento de 4mm. Em uma amostra foram soldados a primeira e a segunda camada com o mesmo eletrodo (E 308) e as demais alternando com a primeira camada com eletrodo para soldagem dissimilar e a segunda camada para soldagem similar de aço inox. As figuras 23 a 25 ilustram os cinco experimentos realizados.

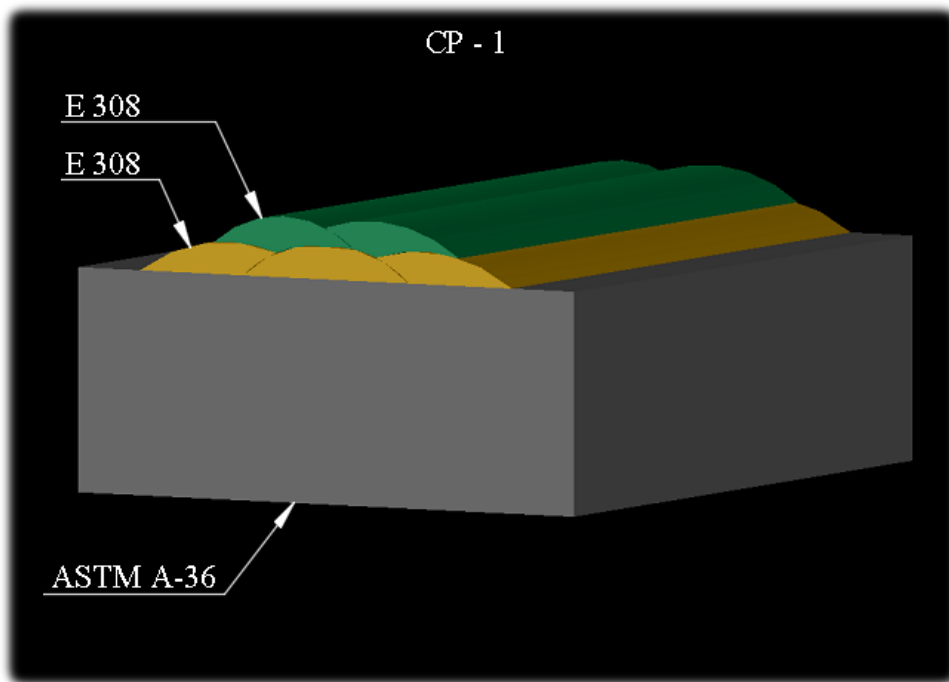


Figura (23) – Corpo de prova CP 1 - 1ª camada E308 / 2ª camada E308

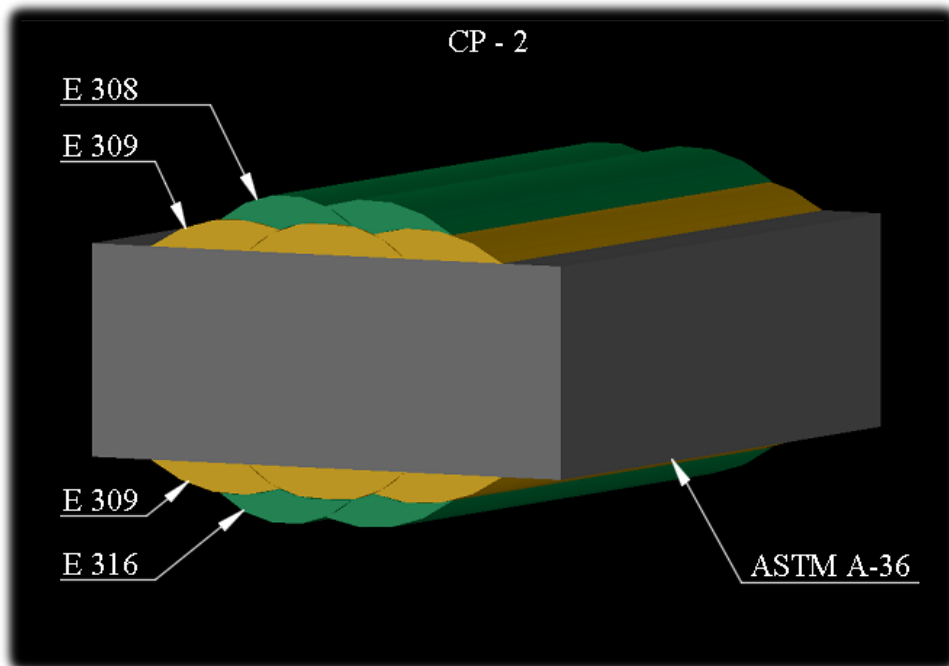
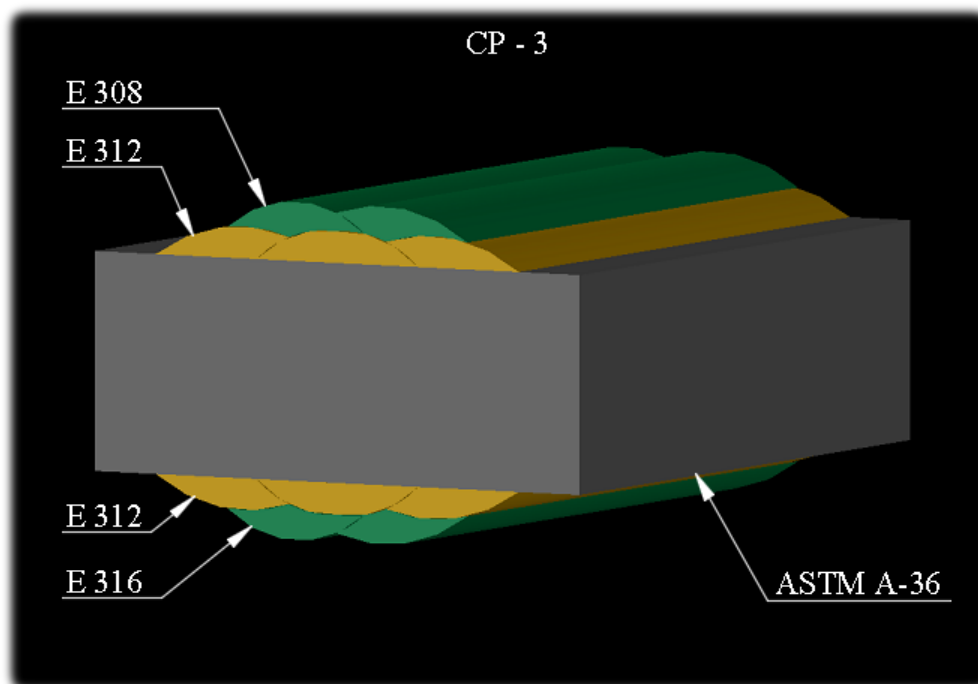


Figura (24) – Corpo de prova CP 2 –Superior: 1ª camada E309 / 2ª camada E308

Infeior : 1ª camada E309 / 2ª camada E316



*Figura (25) – Corpo de prova CP 2 –Superior: 1ª camada E312 / 2ª camada E308
Infeior : 1ª camada E312 / 2ª camada E316*

3.6– Macrografias

As macrografias foram feitas nos três corpos de prova , seguindo as seguintes etapas : corte na seção transversal, lixamento úmido com lixas de granulometria de 80 a 600 mesh, seguido de ataque químico com *Marble*, sua composição é : 4g CuSO₄ + 20ml HCL + 20 ml H₂O e por final retirada de fotos com câmera digital. A figura (26) mostra o reagente utilizado:



Figura (26) – Reagente “Marble”.

3.7– Micrografias

Foram retiradas cinco amostras para embutimento dos três corpos de prova (figura 27):

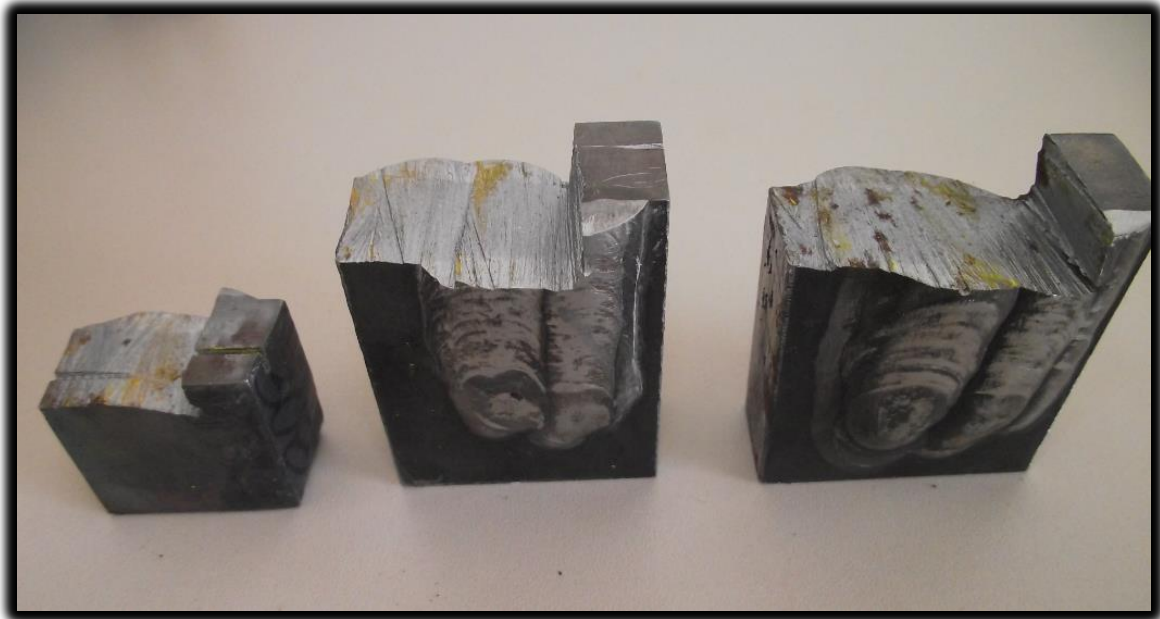


Figura (27) – Corpos de prova após retirada das amostras.

A figura (28) mostra as amostras retiradas após o final de sua preparação :



Figura (28) – Amostras embutidas para micrografia.

Após o embutimento , as amostras foram lixadas com lixas de granulometria de 80 a 3000 mesh e polidas para realização das micrografias em microscópio ótico. O reagente usado para o ataque químico nas amostras foi o *Marble*.

A Figura 29 mostra, de forma clara, a 1ª camada e a 2ª camada:



Figura (29) – Amostra ampliada.

3.8 - Medição de Ferrita pelo Ferritoscópio

A medição de ferrita foi feita nos corpos de prova com um ferritoscópio do fabricante Fischer, modelo FMP 30, disponibilizado pelo professor Paulo Modenesi no laboratório de soldagem da UFMG. A figura (30) mostra o ferritoscópio.

Como a ferrita é magnética, pode ser medida pelo campo magnético produzido; a intensidade pode ser comparada a aparelhos como este, que são calibrados em corpos de prova-padrão, obtendo-se assim a quantidade de ferrita de uma solda.

Foram feitas 6 medidas para cada revestimento produzido. As medidas foram realizadas nas superfícies do revestimento para se determinar o teor de ferrita delta na segunda camada do revestimento, minimizando possíveis influências da primeira camada e do metal de base.



Figura (30) – O ferritoscópio .

3.9 – Cálculo Taxa de Diluição

Para cálculo da taxa de diluição foram feitos cordões solidários dos eletrodos E 308, E 309 e E 312. As imagens das macrografias foram rasterizadas em AutoCad para um cálculo preciso das áreas e medidas dos cordões, segue a fórmula conforme mostrado na figura (31) :

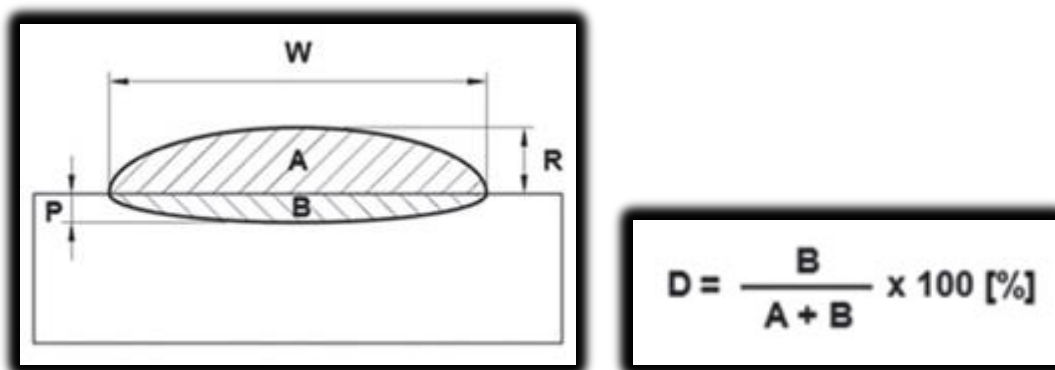


Figura (31) – Fórmula para cálculo da diluição.

3.10 – Planilha em Excel com o Diagrama de Schaeffler

Foi feita uma planilha no programa Excel™ para trabalhar com maior praticidade em cima do diagrama de Schaeffler. No banco de dados da planilha já constam as composições químicas do material de base (ASTM A-36) e dos metais de adição E 308, E 309, E 312 e E316. Além dessas, composições químicas de outros materiais e consumíveis de soldagem podem ser adicionadas ao banco de dados. Nela temos a opção de entrar com uma soldagem entre dois materiais distintos ou três no caso de um amanteigamento ou soldagem de dois materiais dissimilares com um terceiro material de adição. Na figura 32, o ponto vermelho indica a região com os constituintes estimados para a zona fundida. O objetivo é fazer seus cálculos com a composição química da zona fundida, ou seja, a participação dos metais de base e adição com suas respectivas diluições a fim de que fiquem dentro da região esperada.

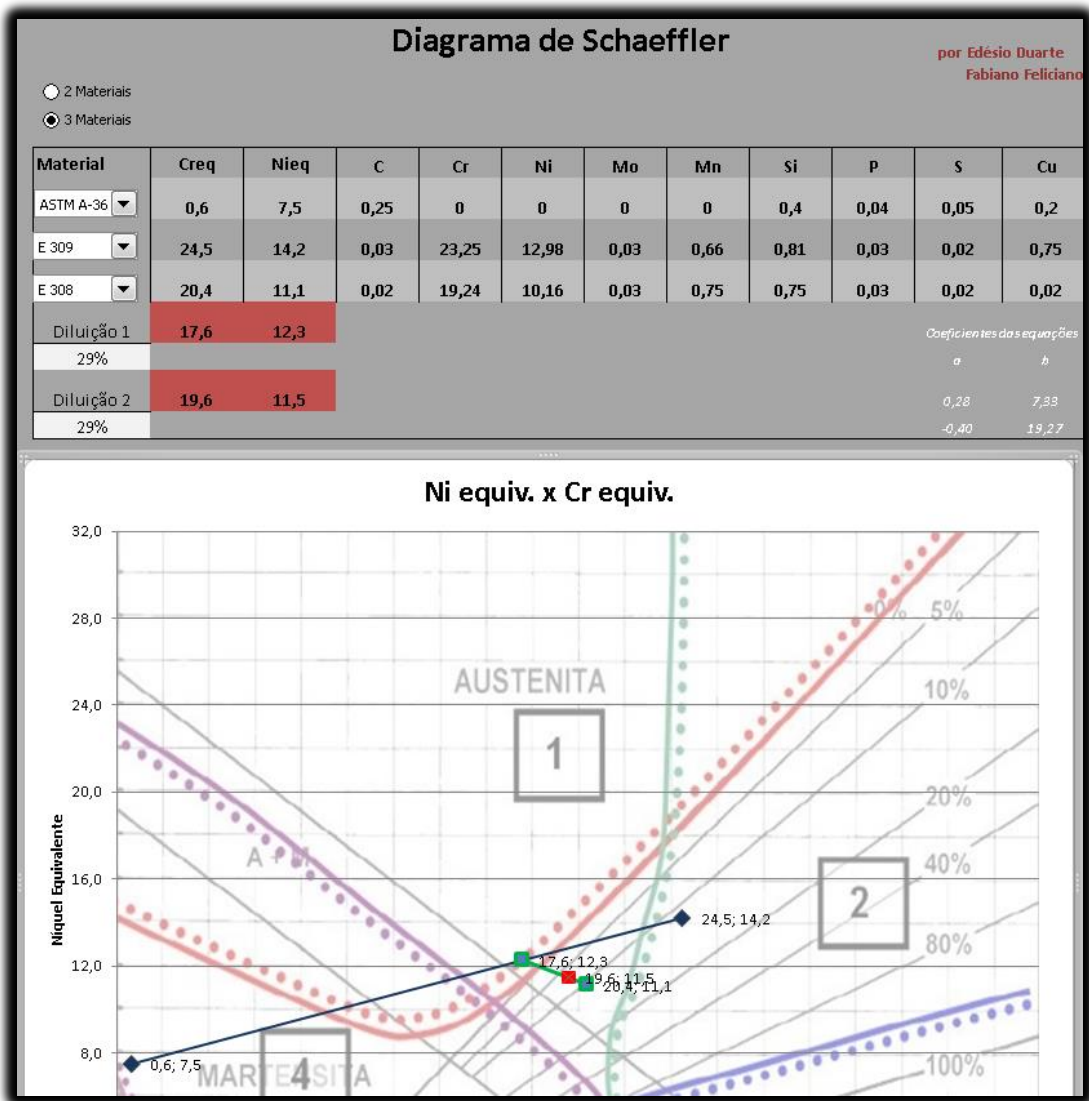


Figura (32) – Imagem da planilha com diagrama de Schaeffler

4 – Resultados Obtidos

4.1 – Macrografia

Não foram verificadas descontinuidades nos revestimentos realizados. A espessura total do revestimento com duas camadas foi de 5 mm, sendo que todos experimentos apresentaram espessura de revestimento superior a 4mm. A Figura 33 mostra as imagens das macrografias realizadas:

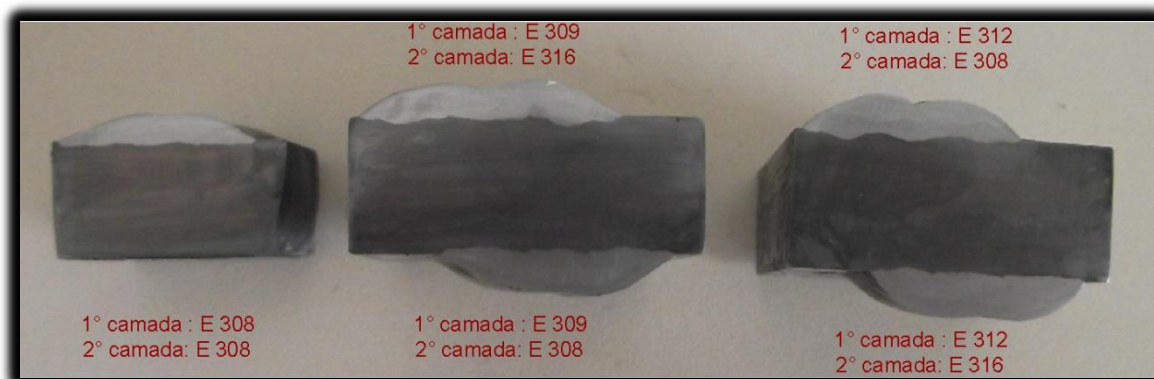


Figura (33) – Macrografia dos corpos de prova. Esc.: 1:1

4.2 – Taxa de Diluição

As figuras 34 a 36 mostram os resultados do cálculo para as diluições dos cordões, todos soldados na corrente de 85 A. Nestas figuras, as medidas de comprimento estão todas em mm.

- E 308-17

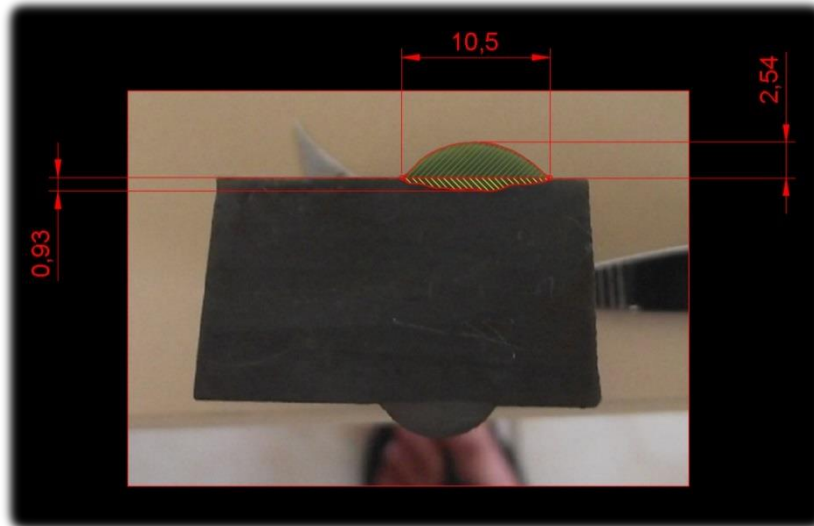


Figura (34) – Macrografia rasterizada em AutoCad E 308-17.

$$W = 10,50$$

$$A = 17,79 \text{ mm}^2$$

$$R = 2,54$$

$$B = 6,44 \text{ mm}^2$$

$$D = [6,44 / (17,79 + 6,44)] \times 100$$

$$P = 0,93$$

$$D_{E 308} = 26,57 \%$$

- E 309L-17

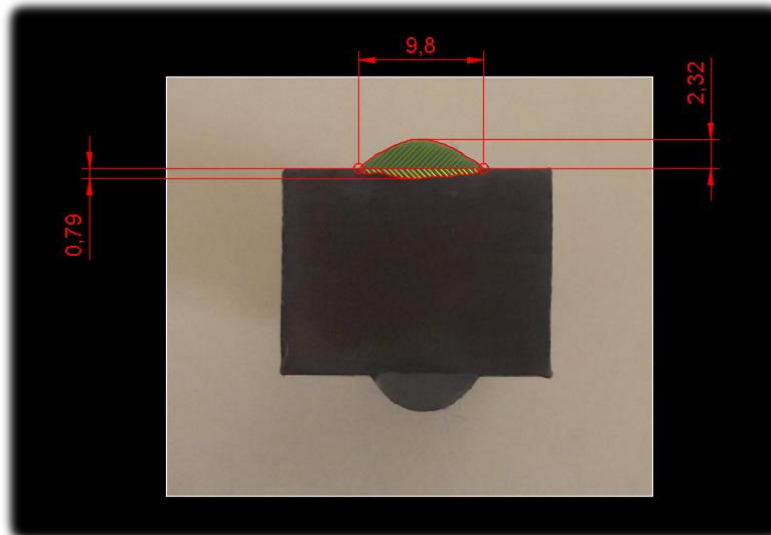


Figura (35) – Macrografia rasterizada em AutoCad E 309L-17.

$$W = 9,80$$

$$A = 14,38 \text{ mm}^2$$

$$R = 2,32$$

$$B = 5,21 \text{ mm}^2$$

$$D = [5,21 / (14,38 + 5,21)] \times 100$$

$$P = 0,79$$

$$D_{E 309} = 26,59 \%$$

- E 312L-17

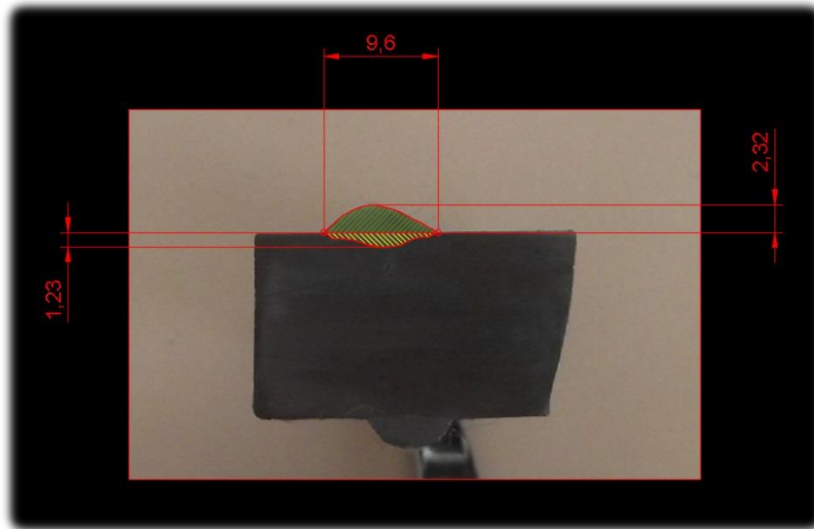


Figura (36) – Macrografia rasterizada em AutoCad E 312L-17.

$$\mathbf{W} = 9,60$$

$$\mathbf{A} = 13,63 \text{ mm}^2$$

$$\mathbf{R} = 2,32$$

$$\mathbf{B} = 6,76 \text{ mm}^2$$

$$\mathbf{D} = [6,76 / (13,63 + 6,76)] \times 100$$

$$\mathbf{P} = 1,23$$

$$\mathbf{D}_{E 312} = \mathbf{33,15 \%}$$

Considerando para efeito de calculo a média das três amostras, obtém-se :

$$\text{Diluição média} = (\mathbf{D}_{E 308} + \mathbf{D}_{E 309} + \mathbf{D}_{E 312}) / 3 = (26,57 + 26,59 + 33,15) / 3$$

$$\text{Diluição média} = 28,77 \%$$

Diluição adotada para uso no gráfico de Schaeffler : 29%

4.3 - Diagrama de Schaeffler x Micrografia

As Figuras 37 a 51 mostram os resultados obtidos com a planilha desenvolvida e as imagens das micrografias (500x) da segunda camada dos revestimentos feitos nos experimentos.

Material de base : ASTM A-36 - 1ª camada : E 308 - 2ª camada : E 308

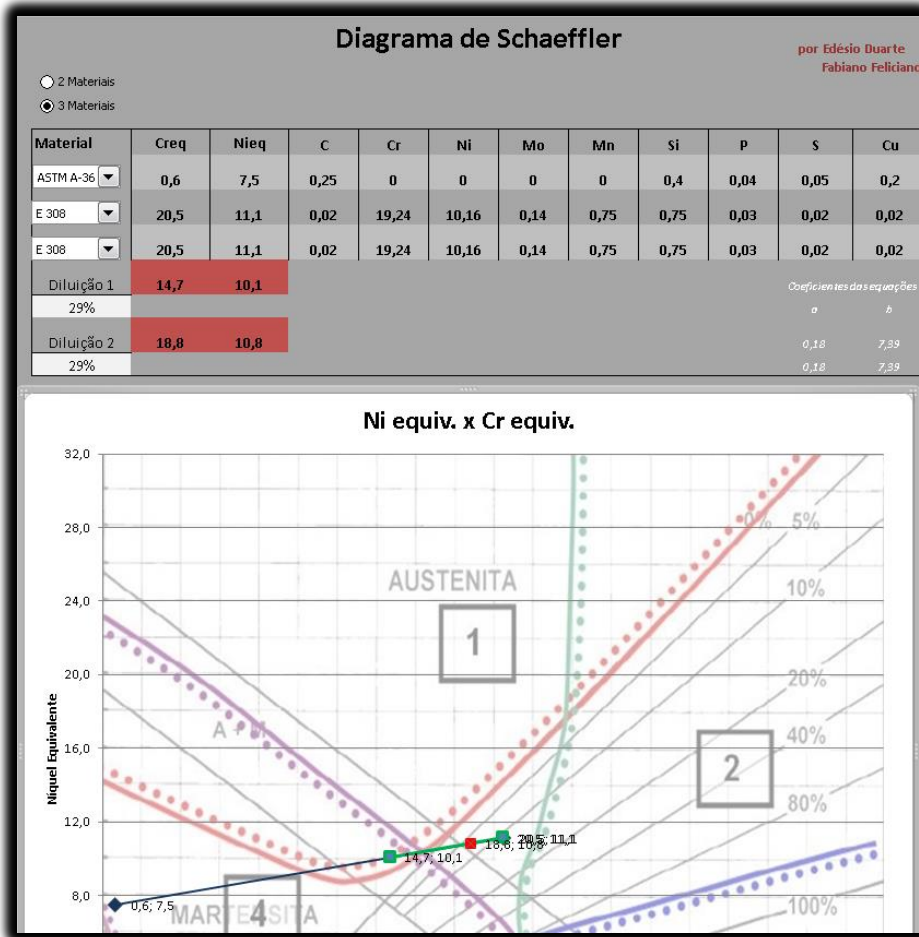


Figura (37) – Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E308 / E308.

Ferrita estimada na 1ª camada: Não consta / Ferrita estimada na 2ª camada : 6%

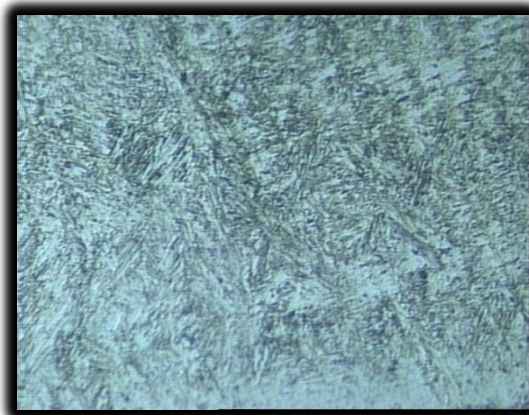


Fig. (38) – 1ª camada: Austenita+Martensita

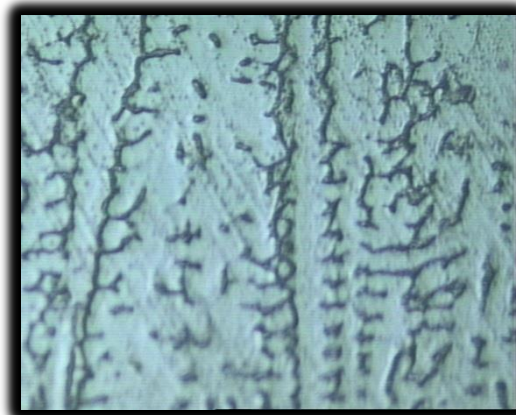


Fig. (39) – 2ª camada: Austenita+Ferrita δ

Material de base : ASTM A-36 - 1ª camada : E 309 - 2ª camada : E 308

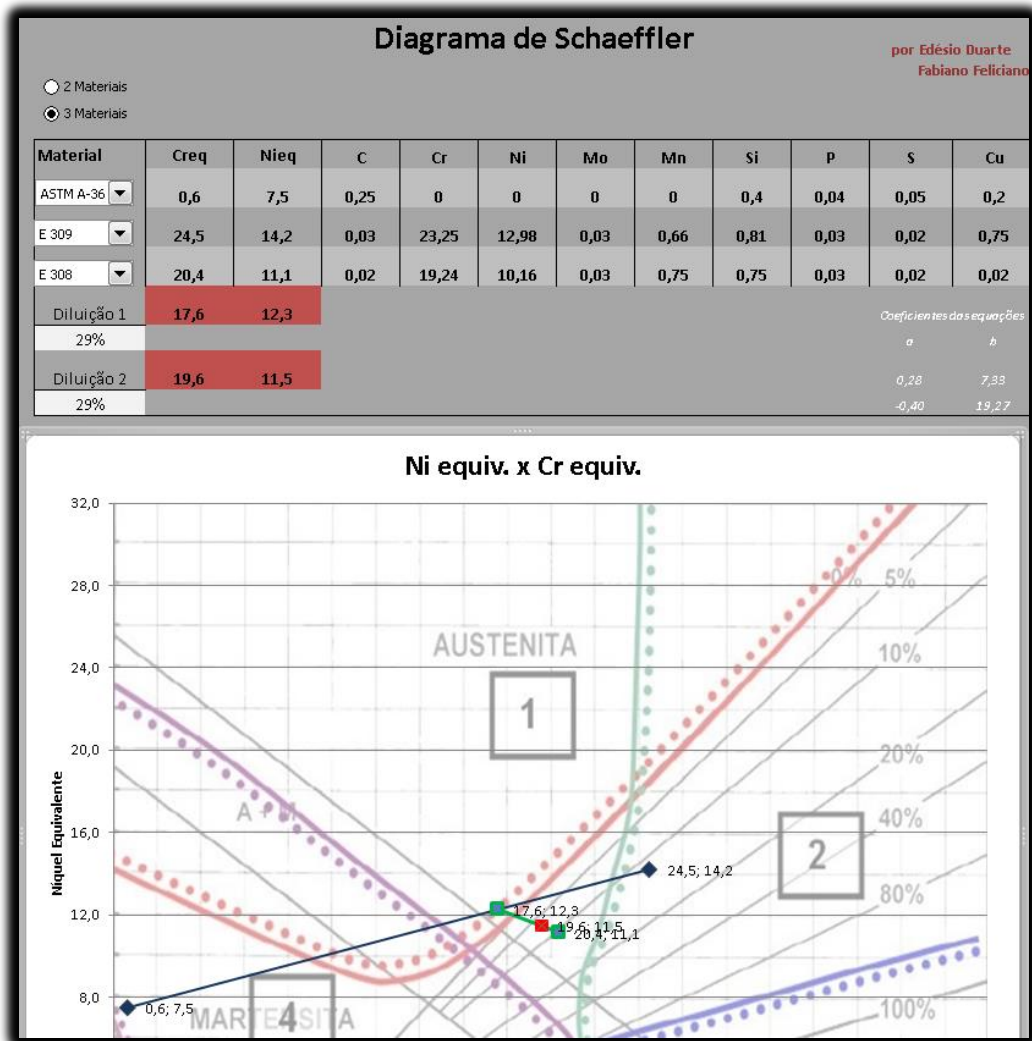


Figura (40) – Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E309 / E308.

Ferrita estimada na 1ª camada: Não consta / Ferrita estimada na 2ª camada : 7%

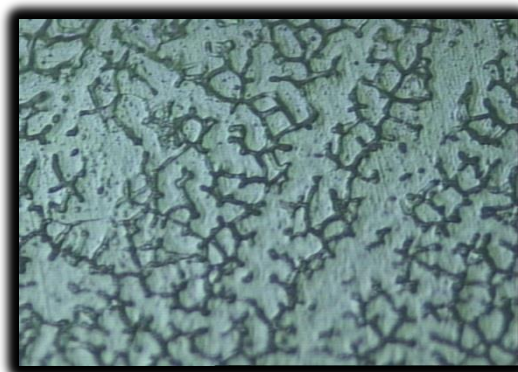
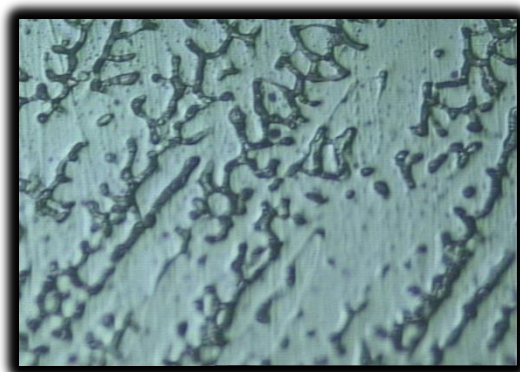


Fig. (41) – 1ª camada: Austenita+Martensita

Fig. (42) – 2ª camada: Austenita+Ferrita δ

Material de base : ASTM A-36 - 1ª camada : E 309 - 2ª camada : E 316

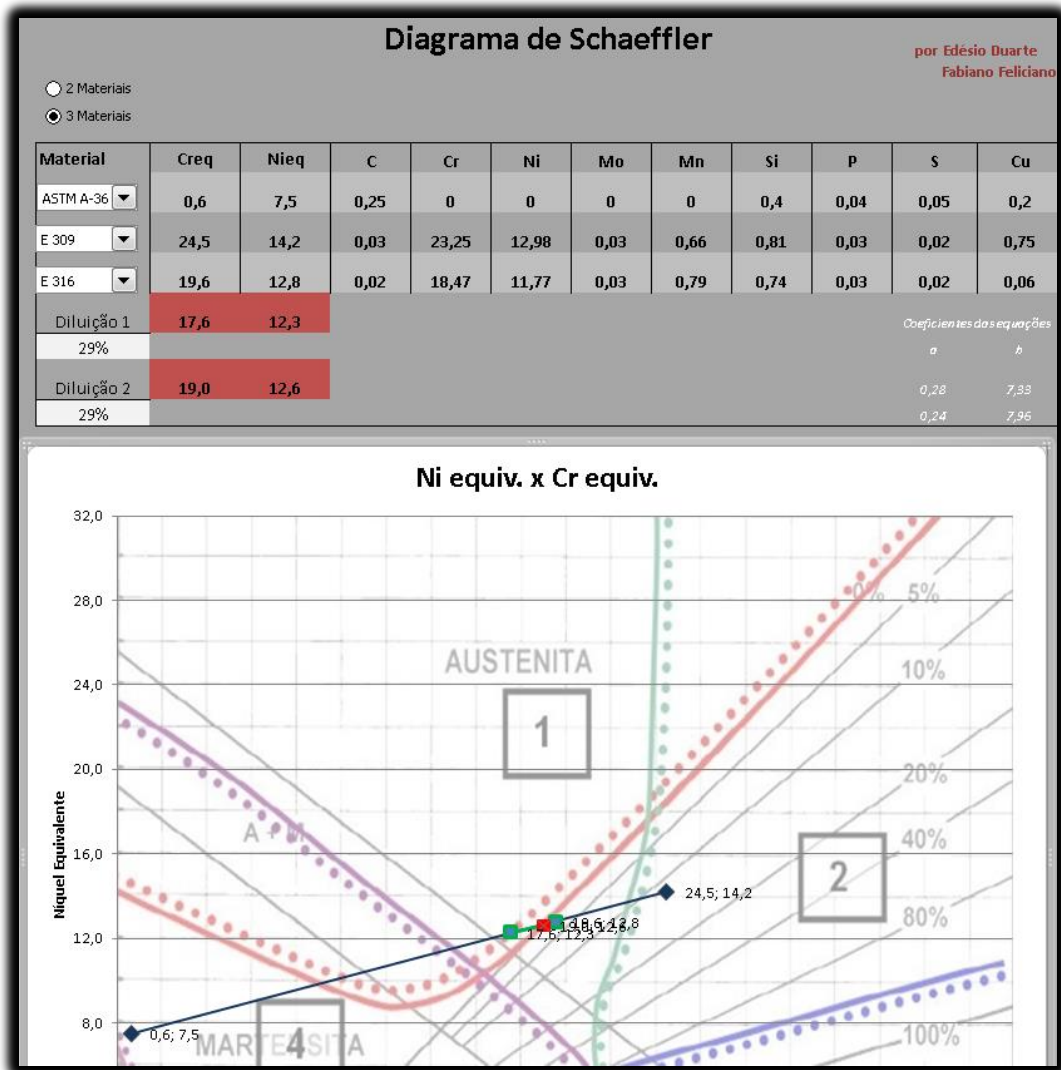


Figura (43) – Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E309/ E316.

Ferrita estimada na 1ª camada: Não consta / Ferrita estimada na 2ª camada : 1%

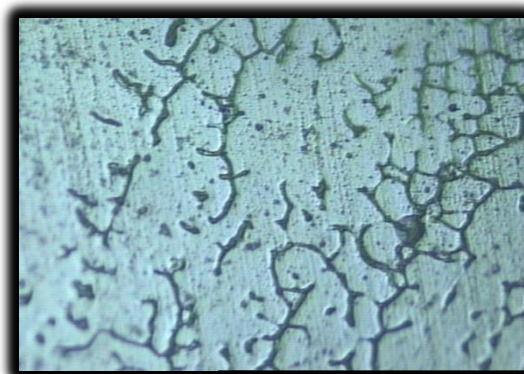
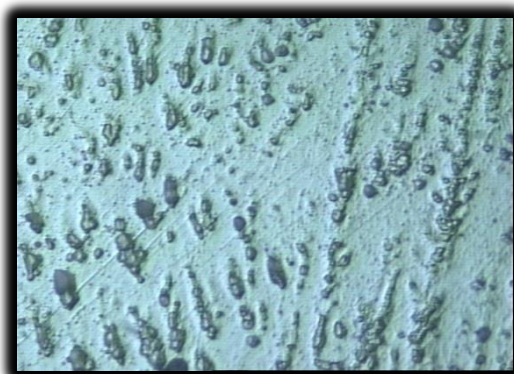


Fig. (44) – 1ª camada: Austenita+Martensita

Fig. (45) – 2ª camada: Austenita+Ferrita δ

Material de base : ASTM A-36 - 1ª camada : E 312 - 2ª camada : E 308

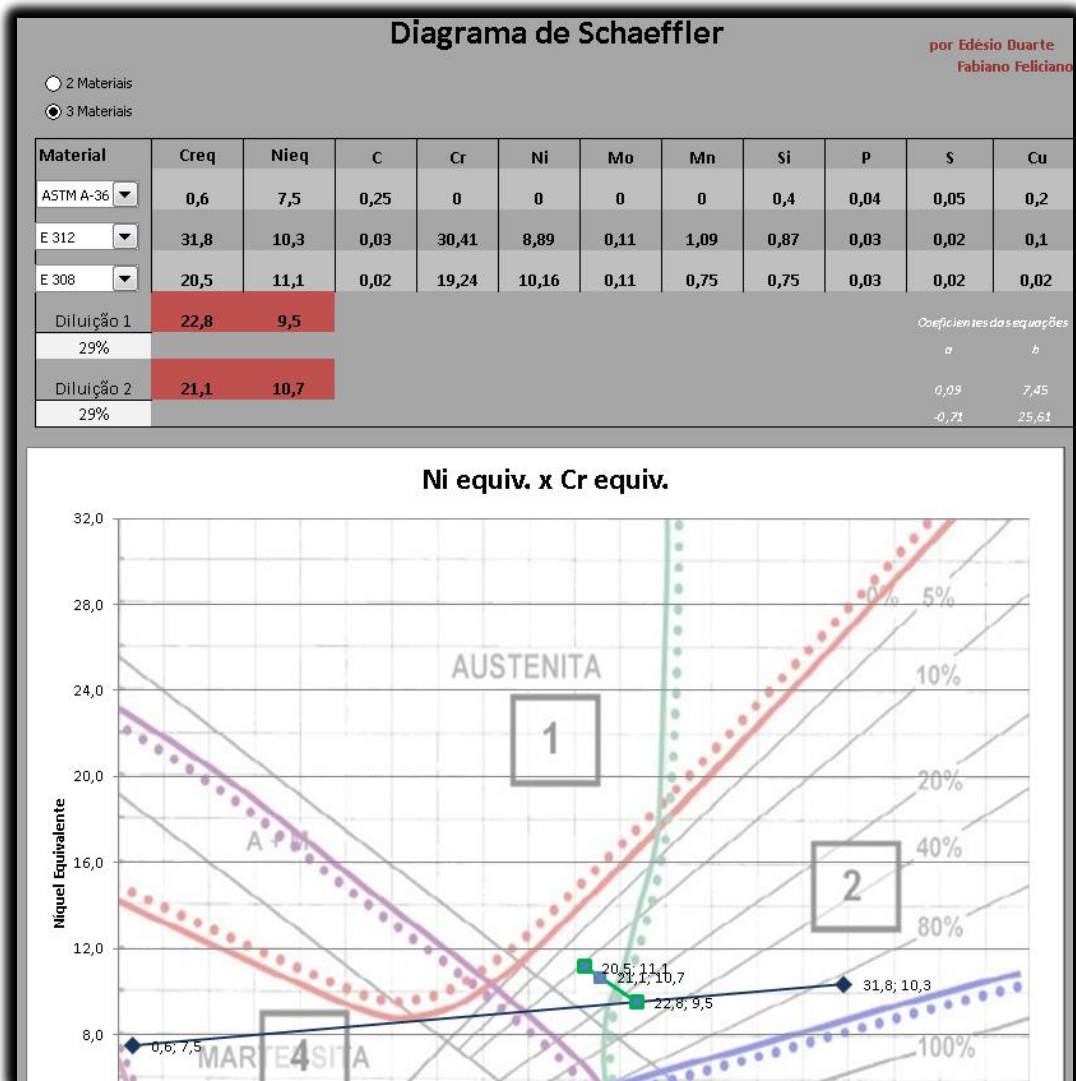


Figura (46) – Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E312/ E308.

Ferrita estimada na 1ª camada: 30% / Ferrita estimada na 2ª camada : 12%

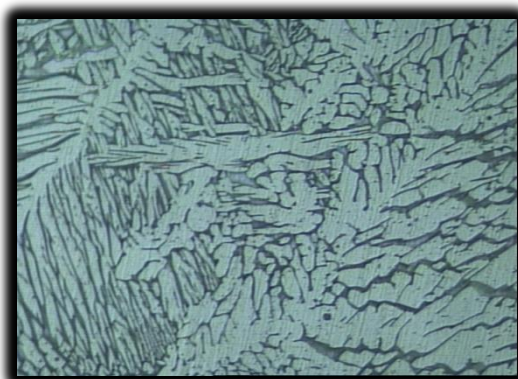


Fig. (47) – 1ª camada: Austenita+Ferrita δ

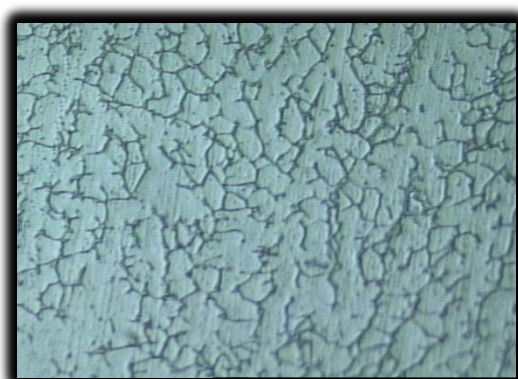


Fig. (48) – 2ª camada: Austenita+Ferrita δ

Material de base : ASTM A-36 - 1ª camada : E 312 - 2ª camada : E 316

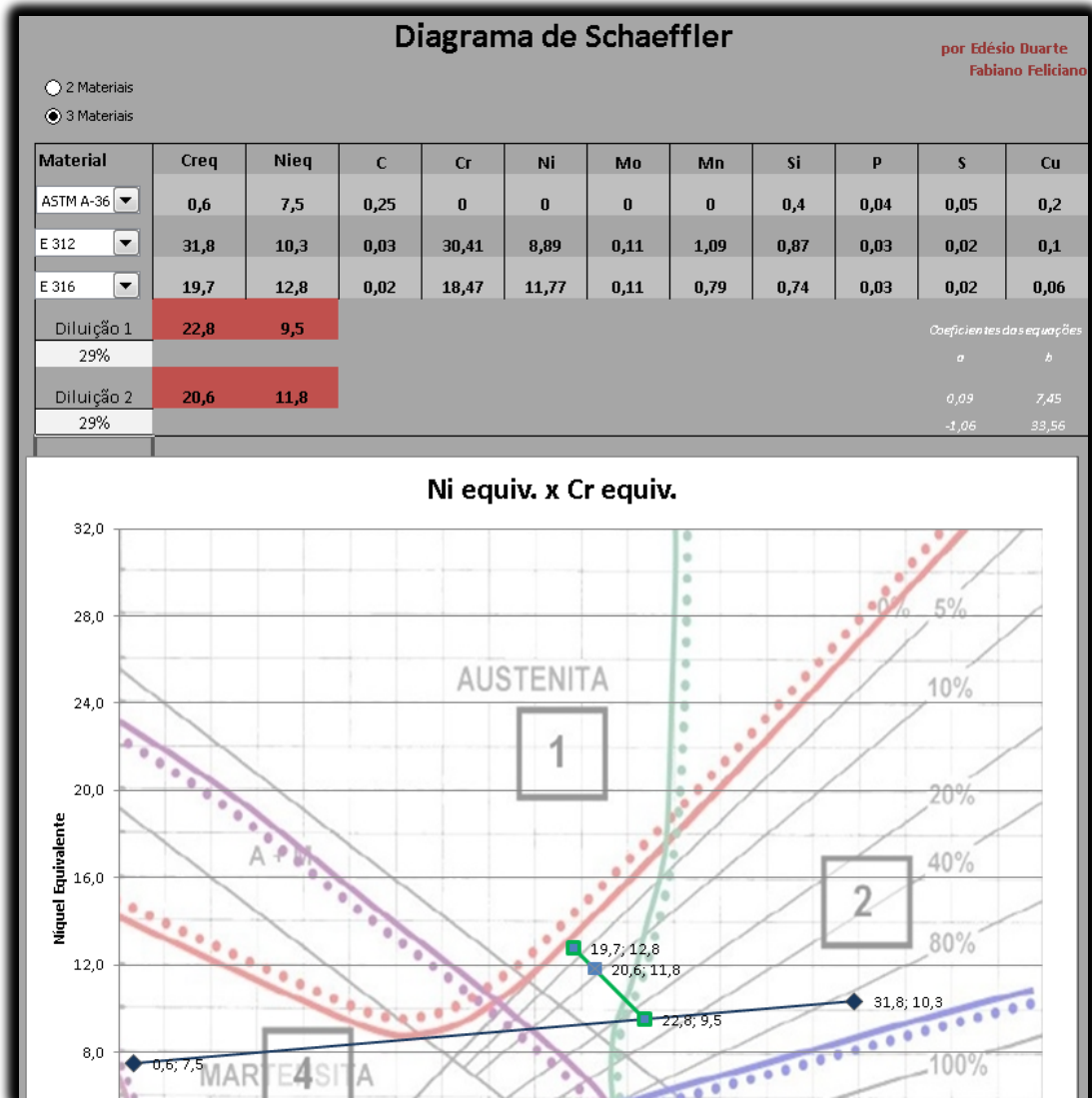


Figura (49) – Imagem da planilha do diagrama de Schaeffler - E312/ E316.

Ferrita estimada na 1ª camada: 30% / Ferrita estimada na 2ª camada : 9%

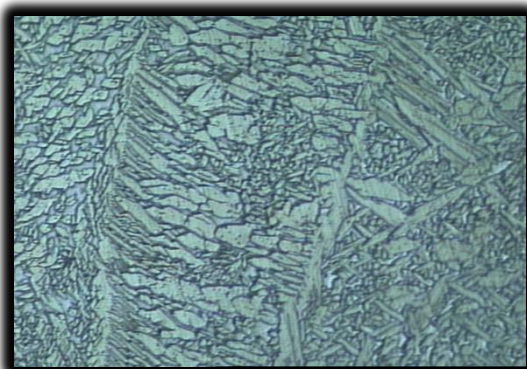


Fig. (50) – 1ª camada: Austenita+Ferrita δ



Fig. (51) – 2ª camada: Austenita+Ferrita δ

4.4 - Diagrama de Schaeffler x Ferritoscópio

Foram feitas 6 medidas para cada revestimento produzido. As medidas foram realizadas nas superfícies do revestimento para se determinar o teor de ferrita delta na segunda camada do revestimento, minimizando possíveis influências da primeira camada e do metal base, a figura (52) mostra os resultados obtidos pelo ferritoscópio e os compara com os resultados previstos pelo diagrama de Schaeffler.

Corpo de prova	Ferritoscópio	Ferritoscópio	Schaeffler
	Média (%)	Desvio Padrão	Valor Empírico (%)
308 / 308	6,3	0,15	6
309 / 308	7,6	0,58	7
309 / 316	1,5	0,59	1
312 / 308	11,3	1,16	13
312 / 316	16,9	2,05	9

Figura (52) – Ferritoscópio x Diagrama de Schaeffler .

Podemos perceber que os valores estimados pelo diagrama de Schaeffler são, em geral, coerentes com os valores medidos pelo ferritoscópio. Com o valor de ferrita δ entre 4 % e 10 % , a solda apresenta boa resistência à formação de trincas durante solidificação, sendo considerada esta quantidade de ferrita a mais adequada para aplicações gerais destes materiais.

4.5 - Avaliação Microestrutural

O estudo metalográfico foi realizado através do microscópio ótico disponível no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG. Somente para a primeira amostra retiramos imagens do metal de base e ZTA, uma vez que o proposito do trabalho é avaliar a zona fundida. As figuras 43, 44 e 45 apresentam a microestrutura do metal de base, ZTA e Zona de Ligação. As figuras 56 a 70 apresentam a microestrutura na 1 camada , Zona de Ligação da 1ª camada com 2ª camada e 2ª camada dos cinco experimentos realizados.

- Material de base: ASTM A-36

- 1ª Camada : E 308 - 2ª Camada : E 308

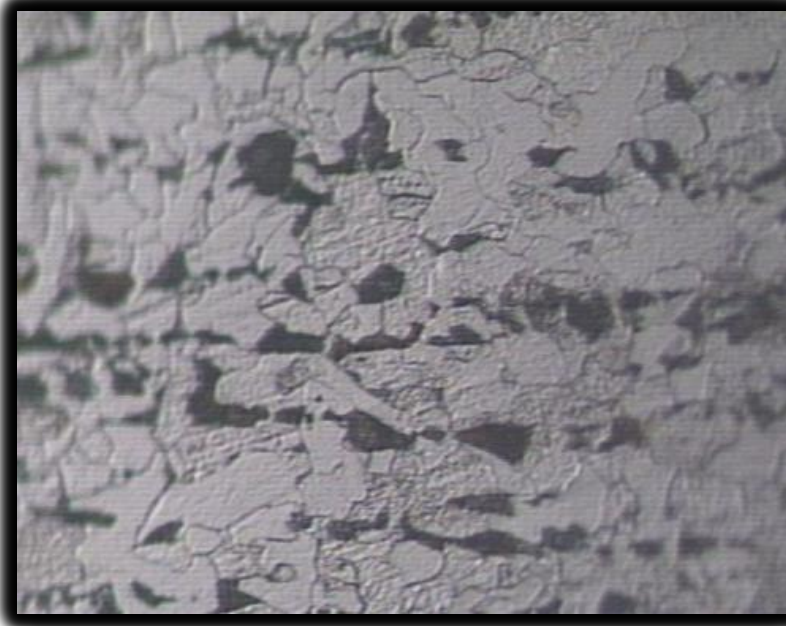


Figura (53) - Material de base 200x – reagente Nital 5%

O metal de base ASTM A-36 apresenta uma microestrutura de aço hipoeutetóide, onde as regiões claras são ferrita e as escuras perlita.

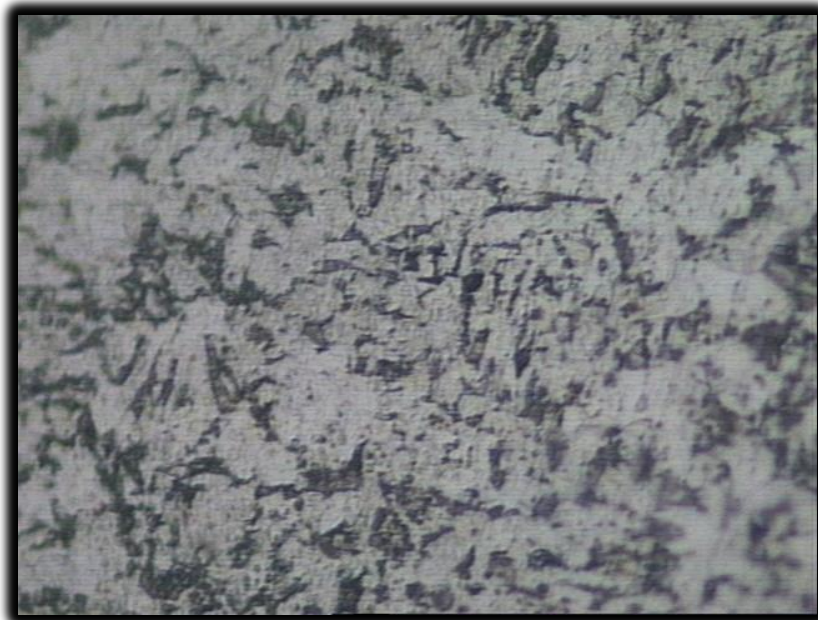


Figura (54) - ZTA 500x – reagente Nital 5%

A ZTA que sofre a influência dos ciclos térmicos da soldagem, e apresenta como consequência alterações microestruturais, incluindo a formação de novos constituintes e mudanças de tamanho de grão.

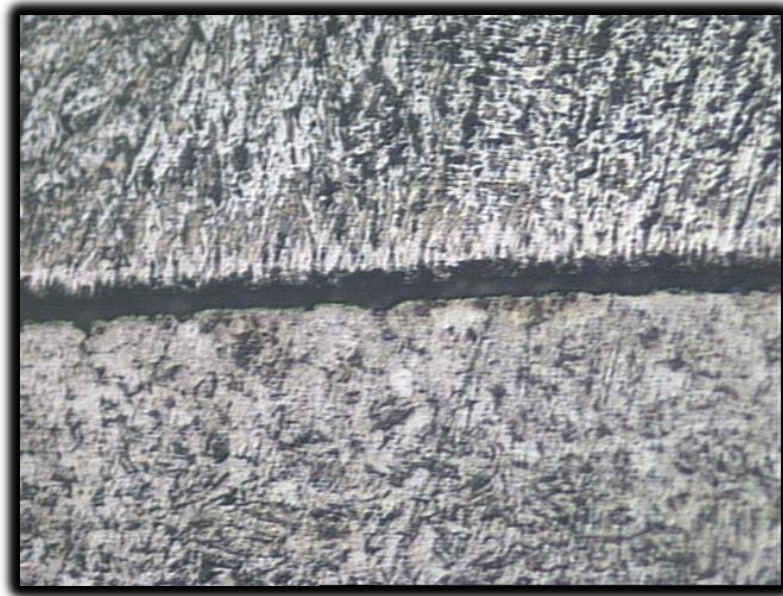


Figura (55) – Zona de ligação 200x – reagente Nital 5%

A zona de ligação composta na parte inferior pelo MB e na superior pela 1ª camada do E 308. Entre elas podemos notar uma faixa escura denominada de ZPD (Zona Parcialmente Diluída). No caso da figura acima ela se apresenta na forma de “praias” e tem uma espessura aproximada de 25 μm .

As Zonas Parcialmente Diluídas são conforme Kejelin (2006) microrregiões provenientes de soldagem dissimilar. Quando se realiza a soldagem de materiais dissimilares ocorre a formação de pequenas zonas descontínuas, duras e frágeis ao longo da interface da linha de fusão. Estas regiões de ordem micrométrica são resultado de uma camada fundida estagnada do metal de base que não foi misturada com o metal de adição durante a soldagem.

Um grande desafio é identificar a quantidade e a localização dessas regiões por não serem evidentes e nem contínuas. A presença destas áreas provoca diferenças de comportamento durante o ataque para revelar a microestrutura e pode provocar modificação das propriedades mecânicas da junta soldada.

As ZPD's podem fragilizar uma solda tornando a junta susceptível ao ataque de corrosão por “pitting”, fragilização por hidrogênio, trincas por corrosão sob tensão, queda de resistência mecânica, em especial impacto e falhas por fadiga.

- *Material de base: ASTM A-36*

- *1ª Camada : E 308*

- *2ª Camada : E 308*

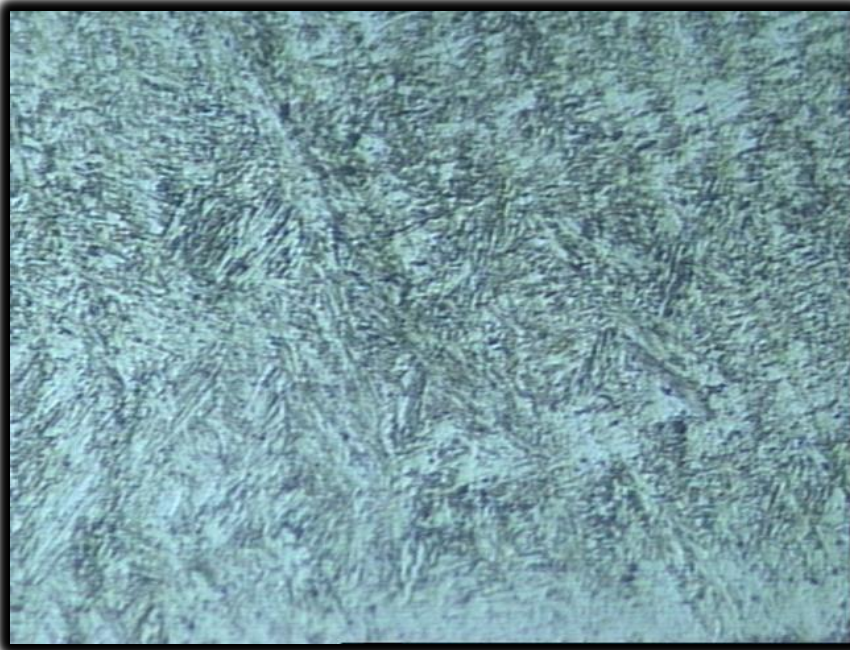


Figura (56) – 1ª camada E308 500x – reagente “Marble”.

Os grãos com formato de agulha são martensita, enquanto as regiões em branco representam a austenita que não se transformou durante o processo de resfriamento.

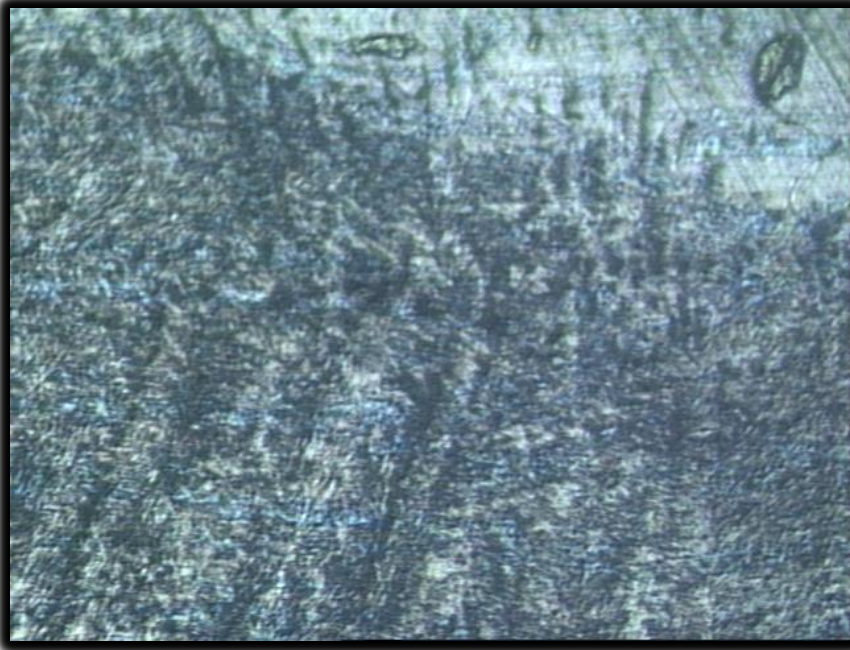
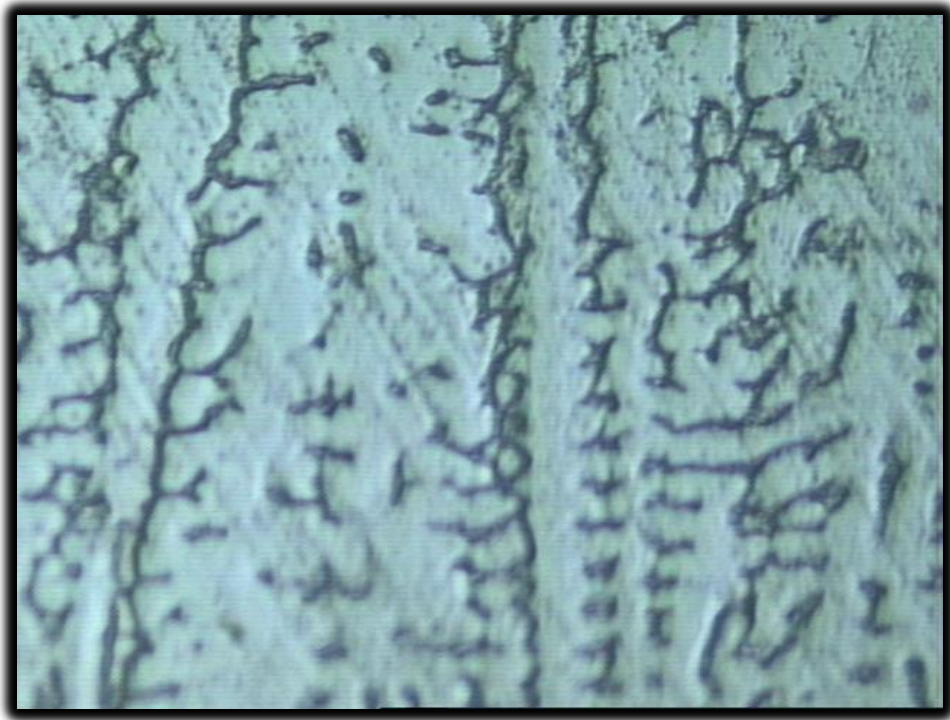


Figura (57) – Zona de ligação da 1ª camada E308 com a 2ª camada E 308 200x – reagente “Marble”.

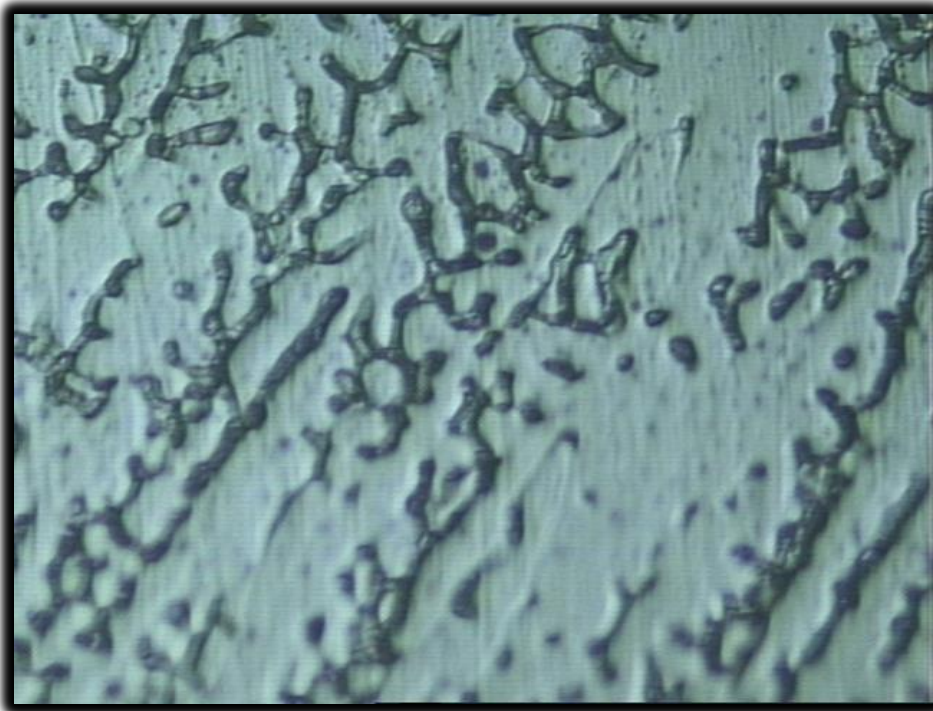


*Figura (58) – 2ª camada E308 500x – reagente “Marble”.
A região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ). Teor de ferrita medida
pelo ferritoscópio: 11,3% , estimado pelo diagrama de Schaeffler : 13%*

- *Material de base: ASTM A-36*

- *1ª Camada : E 309*

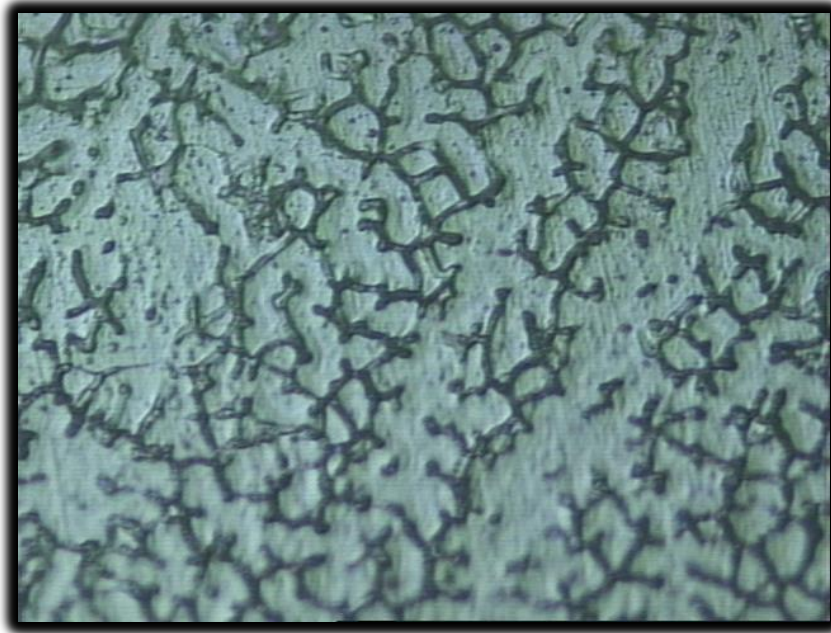
- *2ª Camada : E 308*



*Figura (59) – 1ª camada E309 500x – reagente Marble
A região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ).*



*Figura (60) – Zona de ligação da 1ª camada E309 com a 2ª camada E 308
200x – reagente Marble*



Figura(61) – 2ª camada E308 500x – reagente Marble

A região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ). Teor de ferrita medida pelo ferritoscópio: 7,6% , estimado pelo diagrama de Schaeffler : 7%

- Material de base: ASTM A-36

- 1ª Camada : E 309

- 2ª Camada : E 316

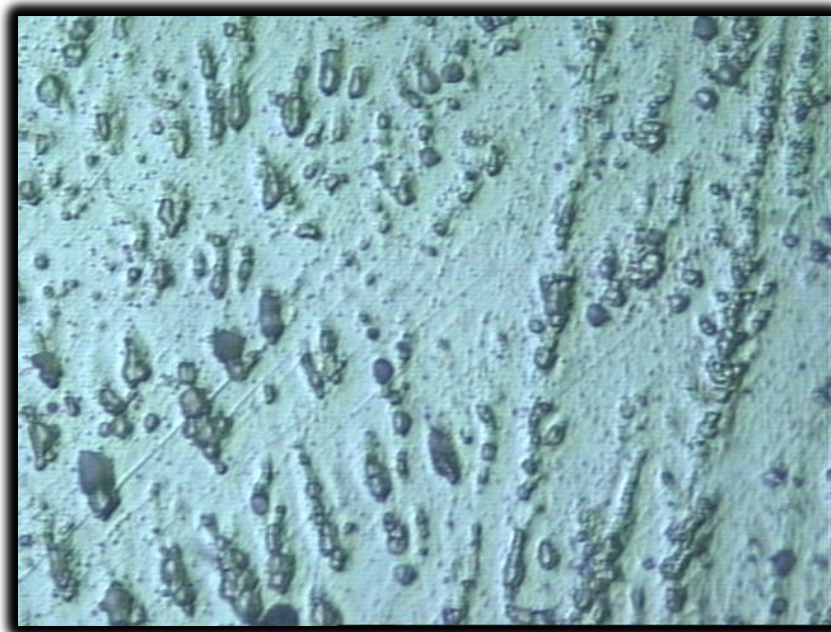
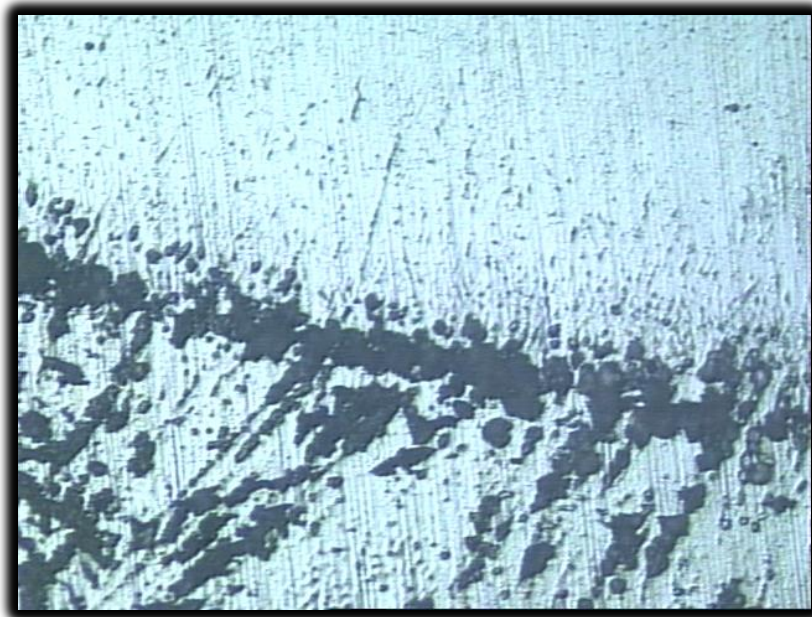
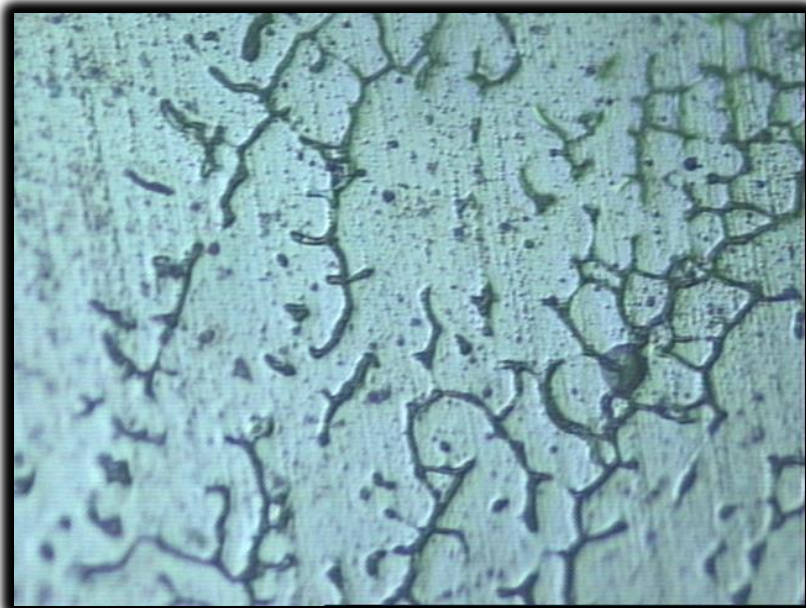


Figura (62) – 1ª camada E309 500x – reagente Marble

A região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ).



*Figura (63) – Zona de ligação da 1ª camada E309 com a 2ª camada E 316
200x – reagente Marble*

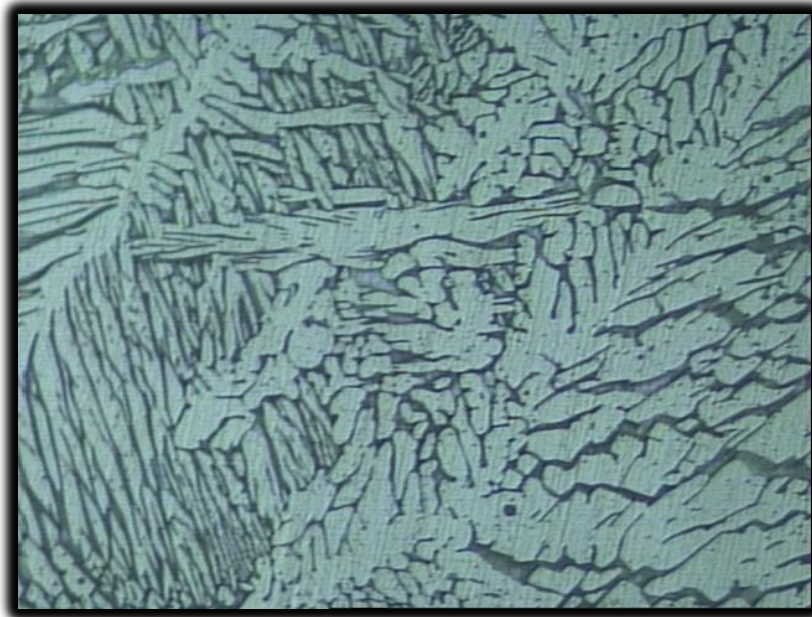


*Figura (64) – 2ª camada E316 500x – reagente Marble
A região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ). Teor de ferrita medida
pelo ferritoscópio: 1,5% , estimado pelo diagrama de Schaeffler : 1%*

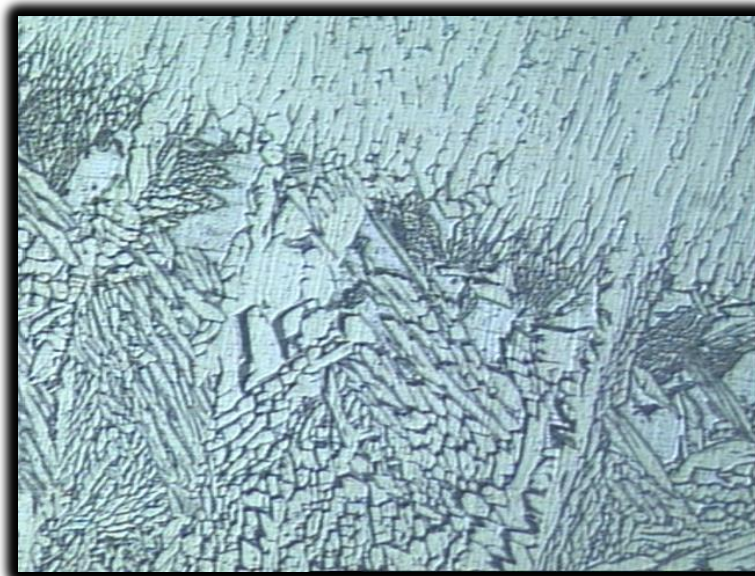
- *Material de base: ASTM A-36*

- *1ª Camada : E 312*

- *2ª Camada : E 308*



*Figura (65) – 1ª camada E312 500x – reagente Marble
A região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ).*



*Figura (66) – Zona de ligação da 1ª camada E312 com a 2ª camada E 308
200x – reagente Marble*

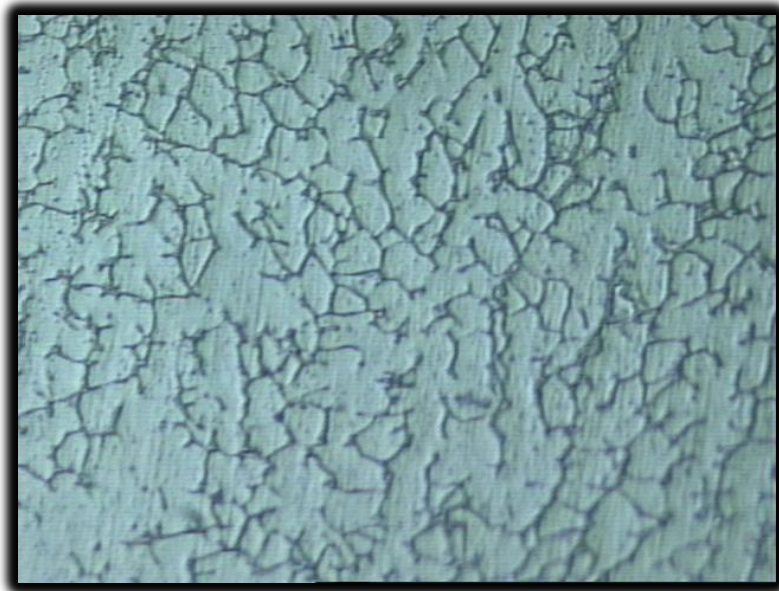
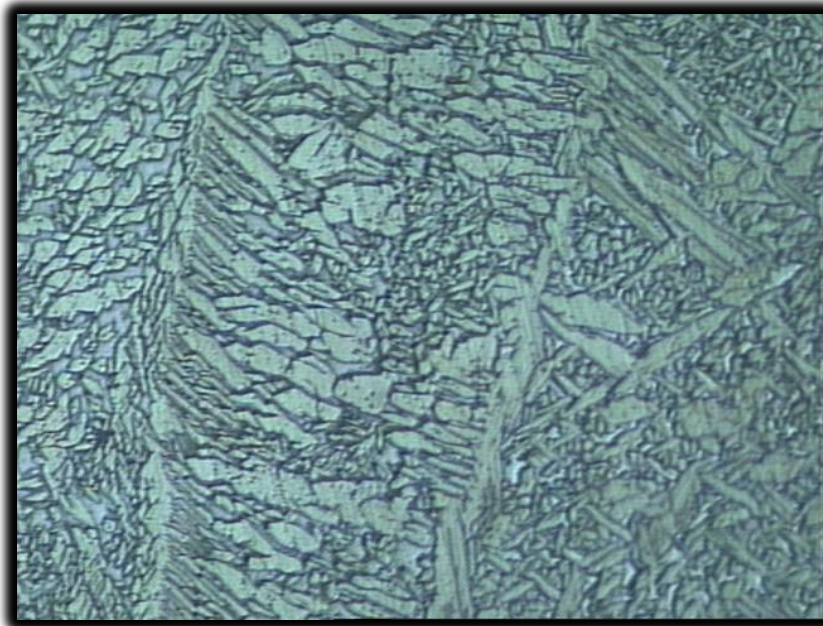


Figura (67) – 2ª camada E308 500x – reagente "Marble" região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ). Teor de ferrita medida pelo ferritoscópio: 11,3%, estimado pelo diagrama de Schaeffler : 13%

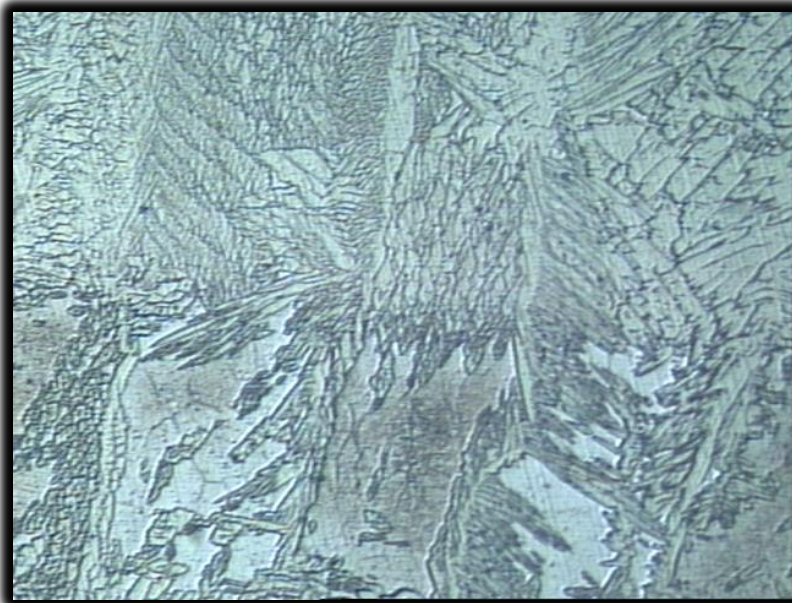
- *Material de base: ASTM A-36*

- *1ª Camada : E 312*

- *2ª Camada : E 316*



*Figura (68) – 1ª camada E312 500x – reagente Marble
A região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ).*



*Figura (69) – Zona de ligação da 1ª camada E312 com a 2ª camada E 316
200x – reagente Marble*

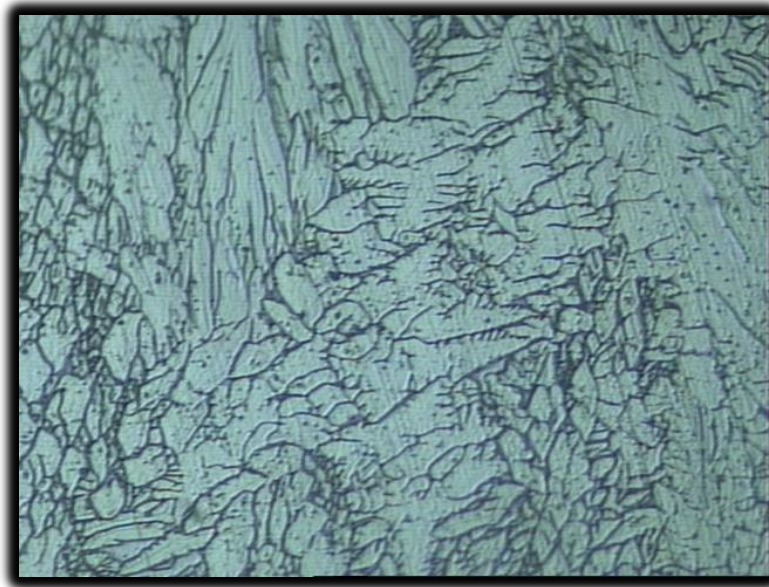


Figura (70) – 2ª camada E316 500x – reagente Marble

A região clara é a austenita e as escuras são ferrita delta (δ). Teor de ferrita medida pelo ferritoscópio: 16,9% , estimado pelo diagrama de Schaeffler : 9%

4.6 - Ensaio de Dureza

O maior valor individual de dureza obtido foi de 230 HV na 2ª camada de E 308 sobre a 1ª camada de também E 308. O menor valor individual de dureza obtido foi de 148 HV na 1ª camada de E 309 , sendo 2ªª camada de E 316. As figuras 71 a 75 apresentam os gráficos obtidos.

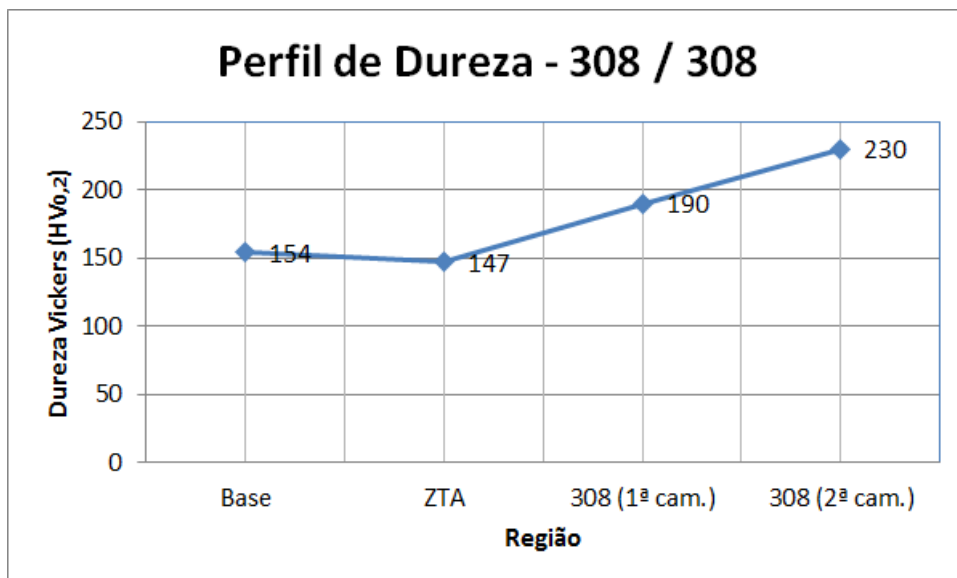


Figura (71) – Perfil de dureza E 308 / E 308

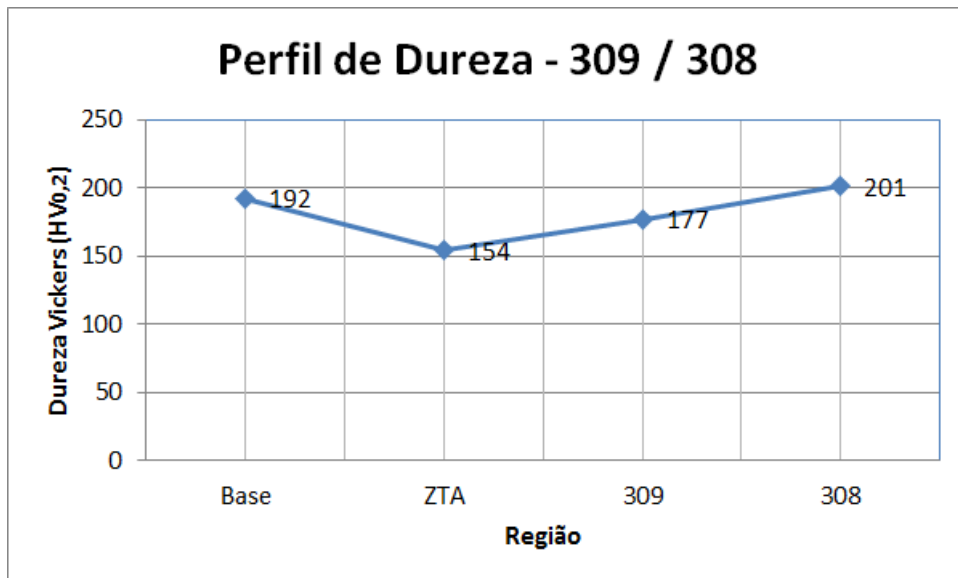


Figura (72) – Perfil de dureza E 309 / E 308

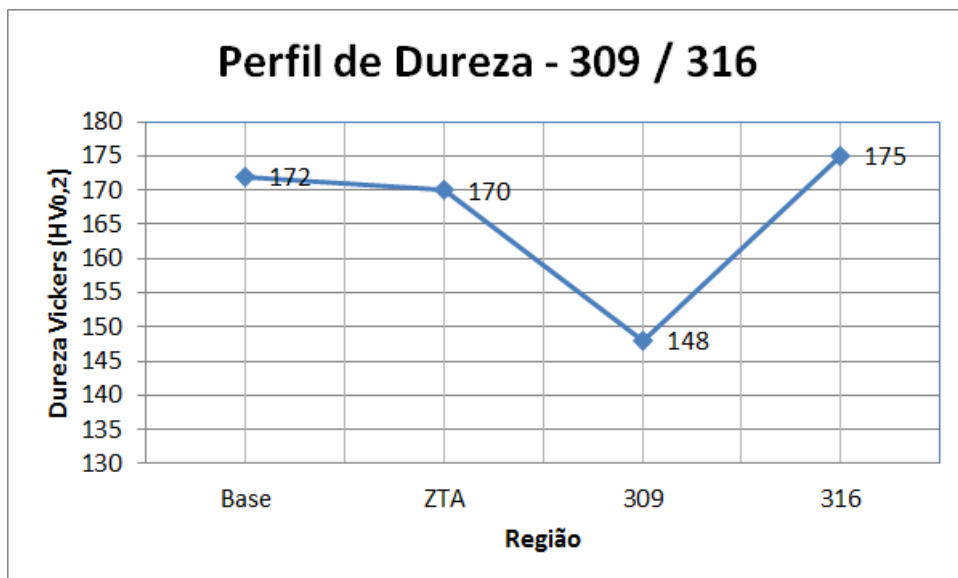


Figura (73) – Perfil de dureza E 309 / E 316

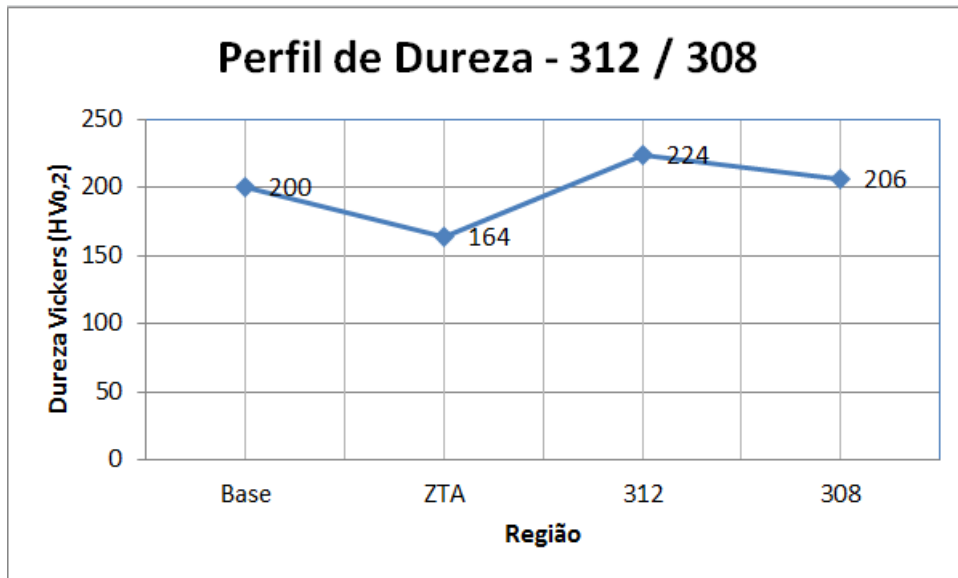


Figura (74) – Perfil de dureza E 312 / E 308

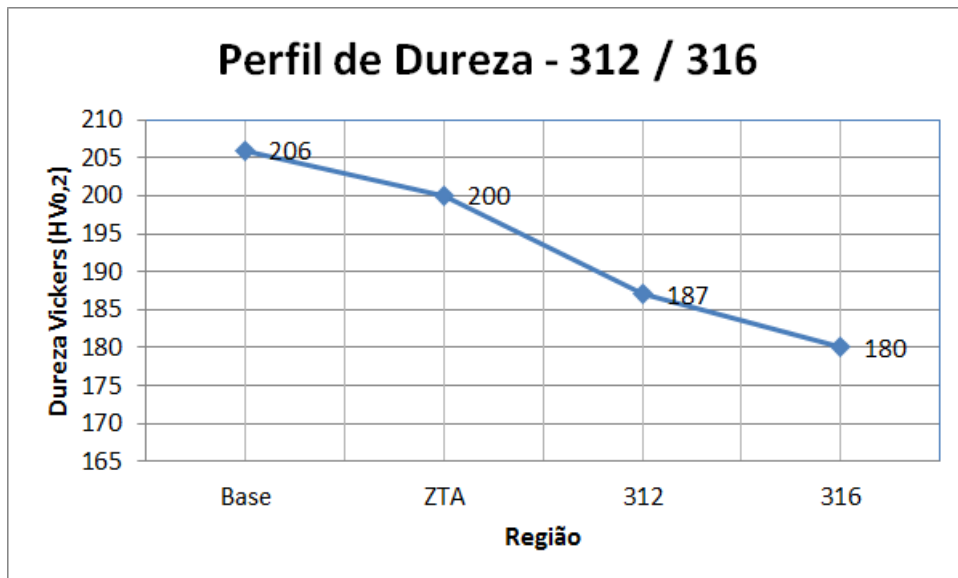


Figura (75) – Perfil de dureza E 312 / E 316

5 – Análise dos resultados

A análise microestrutural foi, de forma geral, condizente com as previsões do Diagrama de Schaeffler, porém em alguns casos podemos notar algumas incoerências da micrografia obtida com a quantidade de ferrita estimada. Estes fatos podem ser explicados pela posição sobre o cordão que a micrografia foi feita. Podemos notar também uma mudança na morfologia da ferrita na micrografia do E 312 , que se da pelo seu alto teor de Cromo e baixo teor de Níquel, aumentando a relação Cr/Ni.

6 - Conclusões

Com base nesta avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento inox austenítico sobre o aço carbono ASTM A-36, podemos concluir que os resultados obtidos pelas análises da microestrutura pelo microscópio ótico e pelos teores de ferrita medidos pelo ferritoscópio, validamos a aplicabilidade do diagrama de Schaeffler para análise e previsão da microestrutura e comportamento de soldas de revestimento inox sobre aço carbono.

A análise nos resultados obtidos indicam que o consumível E 312 assumiu posição de destaque na aplicação de primeira camada de solda de revestimento dissimilar, em função do seu maior teor de ferrita delta e cromo. As combinações feitas com este eletrodo na primeira camada se mantiveram dentro da região isenta de problemas prevista no diagrama de Schaeffler e com teor de ferrita δ acima de 5% (evitando a formação de trincas de solidificação) e menor que 20% (evitando fragilidade por excesso de ferrita δ).

7 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho nos propiciou novos conhecimentos sobre fenômenos envolvidos na soldagem de materiais dissimilares através do processo de soldagem por eletrodos revestidos. Porém, há ainda muitos tópicos que necessitam ser aprofundados nesta linha de pesquisa, dentre os quais podem ser citados :

- Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento inox austenítico sobre aço ligado;
- Avaliar a influência dos parâmetros de soldagem na formação de zonas parcialmente diluídas em soldas de metais dissimilares;
- Avaliar resultados de ensaios mecânicos para juntas soldadas de metais dissimilares.

8 - Referências Bibliográficas

ARATA, Y., MATSUDA, F., KATAYAMA, S.; Solidification cracking susceptibility in weld metals on fully austenitic and duplex microstructures and effect of ferrite on microsegregation. Transactions of JWRI. v.5, n.1, pp. 35-51, 1967.

ASM – Metals Handbook. Alloy Phases Diagrams. Vol. 3, 9th edition. ASM International, 1980.

ASME (American Society of Mechanical Engineers) Welding and Brazing Qualifications, Section IX.

AWS. Welding Handbook: Welding Processes. American Welding Society, v. 2. 8th ed. Miami, 955 p., 1992.

BARBOSA, R. P.; Tecnologia Mecânica – Metalurgia da soldagem, soldabilidade dos materiais, UNILESTE, Coronel Fabriciano-MG, 2007.

BRACARENSE, A. Q.; Processo Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido (SMAW – Shielded Metal Arc Welding) – Material Didático do Curso de Especialização em Soldagem, UFMG, Belo Horizonte, 2014.

CALVO, W. A. P.; Avaliação e caracterização de liga de Níquel tipo 600 após processos de soldagem por fusão TIG, Arco Plasma e LASER. IPEN, Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1997.

CARVAJAL, H. Influência do Insumo de Calor na Corrosão Intergranular dos Aços Inoxidáveis Austeníticos 316 Soldados pelo Processo MIG. Campinas, São Paulo, 1995.

CORDEIRO FILHO, A. C. J. Estudo da Soldabilidade e Avaliação de Corrosão Intergranular em Junta Soldada de Aço Inoxidável AISI 430 pelo Processo TIG. Dissertação de Mestrado. São Luís, 2008.

DAVIS, J.R. Corrosion of Dissimilar Metal Weldments. In: ASM – American Society for Metals, Corrosion of Weldments, cap 9, p. 170, 2006.

ELIAS, M.S.; Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento inox sobre aço SAE 4130. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2013.

FERREIRA, W. E. I.; Influência dos parâmetros de soldagem na sensitização de juntas soldadas em aço inoxidável austenítico aisi 316 soldadas pelo processo Tig. Dissertação de Mestrado. São Luís, 2008.

FOLKHARD, E.; Welding metallurgy of stainless steel, Springer – Verlag, Austria, pg.229-240,1984.

GENTIL, Vicente. Corrosão. Rio de Janeiro, Ed. LTC, 4ª edição, 2003.

GOMES, J. H. F.; Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 utilização de arame tubular inoxidável austenítico. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

GRONG, O. – Metallurgical modeling of welding. 2nd ed, The Institute of Materials, Trondheim, Norway, 581p, 1994.

GUNARAJ, V. and MURUGAN, N.; Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process – Part 1. Welding Research Supplement, October, pp. 286-294, 2000a.

GUNARAJ, V. and MURUGAN, N.; Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process – Part 2”. Welding Research Supplement, November, pp. 331-338, 2000b.

HIGUCHI, M.; SAKAMOTO, H.,TANIOSA,S.A., A study on weld repair trough half bead method.H Engineering Review, Miami,v13,n.2,p 28-33, Apr.1980.

HULL, F. C.; Effect of delta ferrite content on hot cracking of stainless steel. Welding

Journal. v.46, n.9, pp. 399-409, 1967.

IRVING, B.; Dissimilar metal welding paves the way to new ventures, Weld. J.,71(5):27-33,1992.

KEJELIN N, Z.; BUSHHINELLI, A. J. A; POPE, A. M.: Effects of parameters on the Partially Diluted Zones Formation at Dissimilar Metal Welds. In: Anais de 18th International Congress of mechanical Engineering – COBEM: November; Ouro Preto. 2005.

KEJELIN N, Z; Influência dos Parâmetros de Soldagem na Formação de Zonas Parcialmente Diluídas em Soldas de Metais Dissimilares; Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

MACHADO, G. I.; Soldagem & Técnicas conexas: Processos, Livro, Porto Alegre, 1996.

MAGALHÃES, S. G.; Avaliação do revestimento a base de liga de níquel em aço estrutural, empregando o metal de adição ERNiCrMo-3 através da soldagem MIG/MAG. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MARQUES, P. V.; Tecnologia da Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalurgica, Belo Horizonte: ESAB,1991.

MELO M.: Análise dos Modelos Utilizados para a Previsão dos Parametros Microestruturais Obtidos Durante a Solidificação Direcional do Aço Inoxidave Austenitico AISI 304. Revista Escola de Minas, p. 135-140, 2007.

MODENESI, P. J.; Aços Inoxidáveis e Aços Resistentes ao Calor – Material Didático do Curso de Especialização em Soldagem, UFMG, Belo Horizonte, 2014.

MODENESI, P. J.; Soldabilidade dos Aços Inoxidaveis. Senai, Osasco- SP, 2001.

MODENESI, P. J.; Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos materiais - Física da Soldagem (Apostila), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG-MG , 2007.

MODENESI, P. J.; Soldabilidade de algumas ligas metálicas, (Apostila), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de materiais, UFMG-MG, 2008.

MOREIRA, M. F; LEBRÃO, S. M. G. Aços Inoxidáveis. São Paulo, 2002.

MURUGAN, N e PARMAR, R. S. Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 41, n. 4, p. 381-398, 1994.

MURUGAN, N. e PARMAR, R. S. Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding. *Welding Journal*, v. 76, p. 391s-403s, 1997.

NORSOK Standard M601-94, Welding and inspection of piping, Lysaker, Norway; Standard Norway; 2004.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C.; Aços Inoxidáveis Austeníticos: microestrutura e propriedades. Hermus, São Paulo, 1994.

PALANI, P. K. e MURUGAN, N. Optimization of weld bead geometry for stainless steelcladdings deposited by FCAW. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007.

PARANHOS, R.; Revestimento de Aço carbono com Aço Inoxidável Austenítico. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/download/12ddc.pdf>>. Acesso em: 19 novembro 2010.

PHILLIPS, A. L. *Welding Handbook: Special Welding Processes and Cutting*. London: American Welding Society, Vol. 3, 1965.

QUITES, A. M.; Soldagem e Soldabilidade, I.B.Q.N (Instituto Brasileiro de Qualidade Nuclear), Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 1990.

SCHAEFER, A., Dissimilar Metal Weld Failure Problems in Large Steam Generators.
Power, 1979, N. 12, p.68-69.

WAINER, E., BRANDI, S. D., MELLO, F. D. H.; Soldagem: Processos e Metalurgia.
São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1992.