

Mauro Rocha Da Silva

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA POLARIDADE NA
SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO PARA
REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇO CARBONO
UTILIZANDO OS CONSUMÍVEIS ER-309L E ER-
316L.**

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

São Paulo

Março/2013

Mauro Rocha Da Silva

Engenheiro Mecânico - UBC - 1980

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA POLARIDADE NA
SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO PARA
REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇO CARBONO
UTILIZANDO OS CONSUMÍVEIS ER-309L E ER-
316L.**

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

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Eng. Jaime Casanova Soeiro Junior

São Paulo

Março/2013

Existem apenas duas maneiras de ver a vida. Uma é pensar que não existem milagres e a outra é pensar que tudo é um milagre.

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha amada esposa Dr^a Floraci

Alves Barbosa De Oliveira Rocha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me presentear com a fé, saúde, força de vontade e superação, em toda minha trajetória de vida.

A minha família e especialmente minha amada esposa, Floraci, que sempre foi a maior incentivadora, fonte de inspiração e perseverança para que eu nunca desistisse de buscar meus objetivos e jamais descansar antes de tê-los atingido.

Ao Coordenador Professor Doutor Sérgio Duarte Brandi, pela forma diligente e responsável como conduziu o curso, e a todos os professores que me instruíram nesta jornada.

Agradeço aos coordenadores da JBS, que me auxiliaram na execução de ensaios não destrutivos.

Agradeço a todos os professores do curso e colegas de classe pelo companheirismo e colaboração.

Agradeço especialmente orientador Eng. Jaime Casanova Soeiro Junior pelo empenho e espírito de colaboração com que me auxiliou na elaboração desta monografia.

CURRICULUM VITAE

1. Dados Gerais:

1.1 Nome completo: MAURO ROCHA DA SILVA

1.2 Data de nascimento: 29/01/1943

1.3 Local de Nascimento: BELO HORIZONTE - MG

1.4 Escolaridade:

- Engenharia Mecânica;
- Universidade Brás Cubas – Mogi Das Cruzes –SP;
- Graduação em 1980.

2. Capacitação Profissional

2.1 Cursos de formação/especialização:

- Especialização em Engenharia De Soldagem;
- Escola Politécnica da USP
- Graduação em Março 2013

3. Experiência Profissional

Trinta e cinco anos atuando na Inspeção de Equipamentos nas áreas de: Caldeiraria; Montagem e testes; Fabricação de Equipamentos para os seguimentos: Geração de energia; Metroviário; Petroquímico; Ferroviário; Papel e Celulose; Perfuração e Petróleo.

RESUMO

A maneira mais comum de adicionar a resistência à corrosão aos aços carbonos é revesti-los com ligas de aços inoxidáveis. Esse processo é mais econômico do que fabricar o equipamento todo em aço inoxidável, sendo que a superfície revestida fornece excelente proteção contra corrosão. Esse trabalho tem por objetivo estudar o efeito da polaridade na soldagem de revestimento de chapas de aço carbono por ligas de aços inoxidáveis e qualificar um procedimento de soldagem. Para realizar tais objetivos serão utilizados chapas de aço carbono ASTM A36 que foram revestidas com o processo de soldagem eletrodo revestido utilizando os consumíveis ER309L e ER316L com as polaridades direta e reversa. Foi depositada uma camada intermediária do consumível ER 309L-16 e o revestimento final com ER 316L-16. Os ensaios realizados neste trabalho foram o ensaio de dobramento, dureza, análise química e a caracterização metalográfica das juntas soldadas. A composição química, em especial os elementos carbono, cromo e níquel, apresentam variações em função do tipo de polaridade utilizada durante a soldagem de revestimento. Sendo ambos os experimentos qualificáveis pela norma API 6A.

Palavras-chave: 1. Soldagem de Revestimento; 2. Aços Inoxidáveis; 3. Aços Carbono e de Baixa Liga.

ABSTRACT

The most common way to improve corrosion resistance of carbon steels is coating with stainless steel alloys. This process is more economical than manufacture equipment all stainless steel and the coated surface provides excellent corrosion protection. The purpose this work is study the effect of electric arc of polarity in coating welding of carbon steel with stainless steels alloy and the qualification welding procedure. Were used carbon steel plate ASTM A36 that were coated with the SMAW welding process using ER 309L and ER 316L consumables with reverse and direct polarities. The ER 309L consumable was used as intermediate layer and ER 316L consumable was used as last layer of coating. The tests performed in this work were the bending test, hardness, chemical analysis and metallographic characterization of welded joints. The chemical composition, especially the elements carbon, chromium and nickel, depend on the type used polarity during the welding coating. Both welding procedures are qualified by API 6A standard.

Key words: 1. Coating Welding; 2. Stainless Steel; 3. Carbon and Low Alloy Steels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de Schaeffler para estimar o teor de ferrita do metal de solda dos aços inoxidáveis [1].	12
Figura 2.2 - Diagrama WCR-1992 [1].	12
Figura 2.3 - Diagrama de fase, mostrando a estabilização da ferrita (Fe-Cr).	14
Figura 2.4 - Diagrama de fase mostrando estabilização da austenita Fe - Ni).	14
Figura 2.5 - Diagrama de Schaeffler mostrando as regiões de desenvolvimento de problemas típicos na soldagem de aços inoxidáveis [2].	16
Figura 2.6 - Diagrama WRC 1988, para metal de solda para aços inoxidáveis [3].	21
Figura 2.7 - Diagrama ESPY, porcentagem de ferrita do metal de solda de aços inoxidáveis [1].	21
Figura 2.8 - Diagrama de Delong (Fn), metal de solda de aços inoxidáveis [2]	22
Figura 2.9 - Aço AISI 304, Detalhe da Estrutura, Sensitizada, com visível precipitação de carbonetos de cromo, no contorno do grão austenítico, e regiões com o contorno totalmente deteriorado [4].	27
Figura 2.10 - Aço AISI 304, detalhe da estrutura solubilizada, contorno de grãos bem definidos sem precipitação de carbonetos [4].	28
Figura 2.11 - Geometria ideal para cordão de solda de revestimento [5].	32

Figura 2.12 - Geometria ideal para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 50% [5].	34
Figura 2.13 - Menor difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função da menor penetração e diminuição do nível de diluição [5].	34
Figura 2.14 - Maior difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função da maior penetração e aumento do nível de diluição [5]. ...	35
Figura 4.1 - Localização da região onde foram medidas as durezas nos experimentos CP1 e CP2 [12].....	46
Figura 5. 1 - Macrografia do corpo de prova CP1 analisado.....	49
Figura 5. 2 - Macrografia do corpo de prova CP2 analisado.	49
Figura 5. 3 - Microestrutura do metal base do CP1 composta por matriz ferrítica (F) e ilhas de perlita (P). Nital 2%. Aumento 500x.....	50
Figura 5.4 - Microestrutura do metal base composta por matriz ferrítica (F) e ilhas de perlita (P). Nital 2%. Aumento 200x.....	51
Figura 5.5 - Montagem da macrografia do CP1 mostrando as regiões da ZAC próxima do metal de base (a), a ZAC central (b), a ZAC próxima do metal de revestimento (c) e o metal de base (d).....	52
Figura 5.6 - Montagem da macrografia do CP2 mostrando as regiões da ZAC próxima do metal de base (a), a ZAC central (b), a ZAC próxima do metal de revestimento (c) e o metal de base (d).....	53
Figura 5.7 - Microestrutura da ZAC próxima do metal de base do CP1 é basicamente composta por matriz ferrítica (F) e ilhas de perlita degeneradas (P). Nital 2%. Aumento 500x.	54

Figura 5.8 - Microestrutura da ZAC próxima do metal de base do CP2 é basicamente composta por matriz ferrítica (F) e ilhas de perlita degeneradas (P). Nital 2%. Aumento 500x.	54
Figura 5. 9 - Microestrutura da região central da ZAC do CP1. Nital 2%. Aumento 500x.....	55
Figura 5.10 - Microestrutura da região central da ZAC do CP1 mais próxima do metal de revestimento. Nital 2%. Aumento 500x.....	55
Figura 5.11 - Microestrutura da região central da ZAC do CP2. Nital 2%. Aumento 500x.....	56
Figura 5. 12 - Microestrutura da região central da ZAC do CP2 mais próxima do metal de revestimento. Nital 2%. Aumento 500x.....	56
Figura 5. 13 - Microestrutura da ZAC próxima do metal de revestimento do CP1. Nital 2%. Aumento 500x.....	57
Figura 5. 14 - Microestrutura da ZAC próxima do metal de revestimento do CP2. Nital 2%. Aumento 500x.....	57
Figura 5. 15 - Região da camada do revestimento CP1 com ilhas de ferrita (F) em uma matriz austenítica (A) e uma grande dispersão de pontos de escória indicados por setas na cor vermelha. H2C2O4 2H2O 10%. Aumento 500X.	58
Figura 5. 16 - Região da camada do revestimento CP2 com ilhas de ferrita (F) em uma matriz austenítica (A) e uma grande dispersão de pontos de escória indicados por setas na cor vermelha. H2C2O4 2H2O 10%. Aumento 500X.	59
Figura 5. 17 - Ilustração do local da análise química.....	61
Figura 5. 18 - Resultado da análise química a 2,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.....	61

Figura 5. 19 - Resultado da análise química a 2,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.....	62
Figura 5. 20 - Resultado da análise química a 2,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.....	62
Figura 5. 21 - Ilustração do local da análise química.....	64
Figura 5. 22 - Resultado da análise química a 5,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.....	64
Figura 5. 23 - Resultado da análise química a 5,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.....	65
Figura 5. 24 - Resultado da análise química a 5,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.....	65
Figura 5. 25 - Microestrutura do CP1 da região de 2,0 mm após a realização do ensaio de resistência a corrosão Prática A.....	66
Figura 5. 26 - Microestrutura do CP2 da região de 2,0 mm após a realização do ensaio de resistência a corrosão Prática A.....	67
Figura 5. 27 - Microestrutura do CP1 da região de 5,0 mm após a realização do ensaio de resistência a corrosão Prática A.....	68
Figura 5. 28 - Microestrutura do CP2 da região de 5,0 mm após a realização do ensaio de resistência a corrosão Prática A.....	68
Figura 5. 29 - Corpo de prova após o ensaio de dobramento lateral do CP1. Região de interesse marcada com um retângulo isenta de descontinuidade. ..	69
Figura 5. 30 - Corpo de prova após o ensaio de dobramento lateral do CP2. Região de interesse marcada com um retângulo apresentando descontinuidades aceitas conforme o critério de aceitação norma ASME seção IX.	70

Figura 5. 31 - Gráfico demonstrativo dos valores do ensaio de dureza referente ao (CP1).	71
Figura 5. 32 - Gráfico demonstrativo dos valores do ensaio de dureza referente ao (CP2).	71
Figura 5. 33 - Gráfico de comparação entre os experimentos realizados.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química dos principais aços inoxidáveis austeníticos Adaptado da ref. [1].....	5
Tabela 2.2 - Principais aços inoxidáveis martensíticos. Adaptado da ref. [1].	7
Tabela 2.3 - Principais aços inoxidáveis Ferríticos. Adaptado da ref.[1].	8
Tabela 2.4 - Principais aços inoxidáveis Duplex. Adaptado da ref.[1].	10
Tabela 2.5 - Principais aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação. Adaptado da ref. [1].	11
Tabela 2.6 - Propriedades mecânicas do aço austenítico tipo AISI 304, em função do encruamento. Adaptado da ref. [1].	24
Tabela 2.7 - Propriedades físicas dos aços inoxidáveis. em comparação com aço ao carbono. Adaptado da ref. [1]	25
Tabela 2. 8 - Faixas de temperaturas para solubilização de alguns aços.....	27
Tabela 2.9 - Especificação para eletrodos revestidos, Adaptado da ref. [9]. ...	30
Tabela 2.10 - Metais de adição para revestimento depositado por soldagem (weld overlay), em chapa base de aço carbono ou aço baixa liga em equipamentos que não requerem ttat. Adaptado da ref. [10].	31
Tabela 4.1 - Composição química especificada pela norma ASTM para o metal de base A36 [13].....	37
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas especificada pela norma ASTM para o metal de base A36 [13].	37

Tabela 4.3 - Composição química do consumível ER 309L utilizado na camada de transição [9].....	38
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do consumível ER 309L utilizado na camada de transição [10].	39
Tabela 4.5 - Composição química do consumível ER 316L utilizado nas camadas finais de revestimento [9].	39
Tabela 4.6 - Propriedades mecânicas do consumível ER 316L utilizado nas camadas finais de revestimento [9].	40
Tabela 4.7 - Descrição das polaridades utilizadas em cada experimento e do tipo de identificação utilizado neste trabalho.	40
Tabela 4.8 - Quantidade de corpos de prova necessários para a qualificação de um procedimento de soldagem conforme a norma API 6A [12].	41
Tabela 4. 9 - Variáveis utilizadas para cada camada na soldagem do experimento 1.....	42
Tabela 4. 10 - Variáveis utilizadas para cada camada na soldagem do experimento 2.....	43
Tabela 4. 11 - Critério de aceitação para a análise de composição química dos experimentos [12].....	45
Tabela 5. 1 - Resultados dos ensaios de macrografia.....	48
Tabela 5. 2 - Resultados do ensaio de verificação da fração volumétrica da ferrita delta nos corpos de prova CP1 e CP2.....	59
Tabela 5. 3 - Resultado da análise química dos dois experimentos á 2,0 mm.	60
Tabela 5. 4 - Resultado da análise química dos dois experimentos á 5,0 mm.	63
Tabela 5. 5 - Resultados do ensaio de dureza do corpo de prova CP1.....	70

SLD-Monografia 14/2013 – T3

Tabela 5. 6 - Resultados do ensaio de dureza do corpo de prova CP2..... 71

Tabela 5. 7 - Comparação das médias das durezas entre os experimentos..... 72

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM: American Society For Testing And Materials

AWS: American Welding Society

ED's: Ensaio Destrutivo

END's: Ensaio Não Destrutivo

SMAW: Shielded Metal Arc Welding

SNQC: Sistema Nacional de Qualificação e Certificação

US: Ultra-Som

ZAC: Zona Afetada Pela Calor

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.....	3
2.1.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	3
2.1.2 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS	6
2.1.3 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS	7
2.1.4 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.....	9
2.1.5 AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO.....	10
2.1.6 DIAGRAMAS PARA MEDIÇÃO EMPÍRICA DO TEOR DE FERRITA	11
2.1.7 SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	13
2.1.8 DIAGRAMA DE SCHAEFFLER	15
2.1.9 TEOR DE FERRITA	20
2.1.10 DIFERENÇA ENTRE OS DIAGRAMAS:	22
2.1.11 PROPRIEDADES DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	23
2.1.11.1 Propriedades mecânicas.....	23
2.1.12 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	24
2.1.13 PROPRIEDADES A CORROSÃO	25
2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM UTILIZADOS NO REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇOS	28
2.2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA-MIG.	28
2.2.2 SOLDAGEM DE REVESTIMENTO RESISTENTE A CORROSÃO PELO PROCESSO DE ARAME TUBULAR COM PULSAÇÃO TÉRMICA	29
2.2.3 ESPECIFICAÇÃO DE ELETRODOS.	29
2.2.4 PERFIL GEOMÉTRICO DO CORDÃO DE SOLDA DE REVESTIMENTO....	32
2.2.5 CONTROLE DA DILUIÇÃO	33
3. OBJETIVOS	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1 METAL DE BASE.	37
4.2 CONSUMÍVEL UTILIZADO NA SOLDAGEM	38
4.2.1 CONSUMÍVEL UTILIZADO PARA TRANSIÇÃO ENTRE O METAL DE BASE E O METAL DE REVESTIMENTO.	38
4.2.2 CONSUMÍVEL UTILIZADO PARA REVESTIMENTO DA CAMADA DE TRANSIÇÃO	39
4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.....	40
4.3.1 EXPERIMENTOS	40
4.3.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	41

4.3.2.1 NORMA API 6A.....	41
4.3.3 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA SOLDAGEM	42
4.3.4 CONTROLE DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM	43
4.4 ENSAIOS REALIZADOS.....	43
4.4.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA.....	43
4.4.1.1 MACROGRAFIA.....	43
4.4.1.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	44
4.4.1.3 QUANTIFICAÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA DELTA	44
4.4.2 ANÁLISE QUÍMICA	45
4.4.2.1 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO	45
4.4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO.....	45
4.4.3.1 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO	46
4.4.4 ENSAIOS MECÂNICOS	46
4.4.4.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL	46
4.4.4.1.1 Critério de Aceitação.....	46
4.4.4.2 ENSAIO DE DUREZA.....	47
4.4.4.2.1 Critério de Aceitação.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA	48
5.1.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MACROGRAFIA	48
5.1.2 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	49
5.1.3 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA DELTA.....	59
5.2 ANÁLISE QUÍMICA.....	60
5.2.1 ANÁLISE QUÍMICA NA REGIÃO DE 2,0 mm DO METAL DE REVESTIMENTO	60
5.2.2 ANÁLISE QUÍMICA NA REGIÃO DE 5,0 mm DO METAL DE REVESTIMENTO	63
5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO (PRÁTICA A)	66
5.3.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO (PRÁTICA "A") NA REGIÃO DE 2,0 mm DO METAL DE REVESTIMENTO.....	66
5.3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO (PRÁTICA "A") NA REGIÃO DE 5,0 mm DO METAL DE REVESTIMENTO.....	67
5.4 ENSAIOS MECÂNICOS.....	69
5.4.1 DOBRAMENTO LATERAL	69
5.4.2 ENSAIO DE DUREZA	70
6. CONCLUSÕES.....	73
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	74
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	75
ANEXO I CÁLCULO DA DILUIÇÃO.....	78

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis tem tido grande destaque no meio industrial nos últimos anos por permitir que superfícies com propriedades anti - corrosivas sejam obtidas a partir de materiais de baixo custo, tais como os aços carbono e aços de baixa liga.

O que motivou o estudo dos efeitos da polaridade na soldagem através do processo a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), foi o fato de que em princípio, as modificações causadas pela troca da polaridade estão relacionadas a inversão da distribuição de cargas elétricas no plasma e a troca de posição da região de maior temperatura do arco elétrico.

Deste modo, em soldagens com a polaridade reversa (+), as cargas negativas estão concentradas na ponta do eletrodo enquanto que as cargas positivas no depósito.

Além disso, o polo positivo tende a apresentar sempre as maiores temperaturas devido ao efeito térmico do bombardeamento dos elétrons.

Em soldagens com a polaridade direta (-) este quadro é invertido e ocorre exatamente o contrário.

Portanto, sugere-se que a troca de polaridade não tenha um efeito qualitativo suficientemente grande para alterar todo o mecanismo de transferência dos elementos. Entretanto, acredita-se que ela seja responsável por provocar pequenas modificações na composição química do depósito de

SLD-Monografia 14/2013 – T3

solda, porque os valores de composição química do metal de adição tendem a variar de acordo com a polaridade de soldagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

O aço inoxidável é o nome dado à família de aços resistentes a corrosão e ao calor contendo no mínimo 11 % de cromo.

Existe uma variedade de aços inoxidáveis com níveis progressivamente maiores de resistência à corrosão e resistência mecânica. Isso é resultado da adição controlada de elementos de liga, cada um deles originando atributos específicos com relação a resistência mecânica e resistência a corrosão em diferentes meios ambientes.

Os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco famílias básicas: Ferrítico, Martensítico, Austenítico, Duplex e Endurecível por Precipitação [1].

2.1.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos têm por base o sistema ternário Fe-Cr-Ni. O cromo oxida fornecendo resistência à corrosão até a temperatura aproximada de 649°C e o níquel muda a estrutura cristalina em temperatura ambiente para um arranjo atômico cúbico de face centrado (CFC) que não é magnético [1].

Dependendo do teor de níquel os aços inoxidáveis austeníticos fornecem uma boa resposta ao aumento de resistência mecânica por trabalho a

frio, isso permite seu uso em operações severas de conformação evitando ruptura prematura e trincas [1].

O endurecimento por encruamento é acompanhado pelas mudanças parciais na estrutura com a conformação de uma fase de martensita ferro magnética o que explica porque com a deformação a frio pode ocorrer o encruamento nos aços inoxidáveis martensíticos [1]

Os aços inoxidáveis austeníticos mais usados são do tipo AISI 304L. Este possui teor de 18% de Cr e 8% de níquel e apresenta excelente ductilidade, conformabilidade e tenacidade. Comumente utilizado para trabalhos em temperaturas criogênicas [1]

O molibdênio é adicionado em alguns dos aços inoxidáveis austeníticos para aumentar sua resistência aos mecanismos de corrosão localizados, tais como corrosão galvânica por pite ou alveolar [1].

A adição de molibdênio acima de 2% eleva a resistência à corrosão localizada (como no tipo AISI 316: (0,08 C Max.;16-18 Cr; 10-14 Ni; 2-3 Mo) [1]

Para meios mais agressivos com teor de cloretos mais elevados, os teores de Níquel e Molibdênio são maiores. [1]

Os principais tipos de aços inoxidáveis austeníticos estão listados na tabela 2.1 [1].

Tabela 2.1 - Composição química dos principais aços inoxidáveis austeníticos
Adaptado da ref. [1].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS PRINCIPAIS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS (%PESO)									
TIPO	Nº UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OUTROS
201	S20100	0,15	5.5 -7,5	1.0	16.0 - 18.0	3.5 – 5.5	0.060	0.03	0.25 N
202	S20200	0,15	7.5 -10.0	1.0	17.0 - 19.0	4.0 – 6.0	0.060	0.03	0.25 N
304	S30400	0,08	2.0	1.0	18.0 – 20.0	8.0 – 10.0	0.045	0.03	-
304L	S30403	0,03	2.0	1.0	18.0 – 20.0	8.0 – 11.0	0.045	0.03	-
308	S30800	0,08	2.0	1.0	17.0 – 19.0	10.0 - 13.0	0.045	0.03	-
309	S30900	0,2	2.0	1.0	19.0 – 21.0	10.0 – 12.0	0.045	0.03	-
309S	S30908	0,08	2.0	1.0	22.0 – 24.0	12.0 -15.0	0.045	0.03	-
310	S31000	0,25	2.0	1.5	22.0 – 24.0	19.0 – 22.0	0.045	0.03	-
310S	S31008	0,08	2.0	1.5	24.0 – 26.0	19.0 – 22.0	0.045	0.03	-
316	S31600	0,03	2.0	1.0	23.0 – 26.0	10.0 – 14.0	0.045	0.03	2.0 – 3.0 Mo
316H	S31609	0,08	2.0	1.0	16.0 – 18.0	10.0 – 14.0	0.045	0.03	2.0 – 3.0 Mo
316L	S31603	0,03	2.0	1.0	16.0 – 18.0	10.0 – 14.0	0.045	0.03	2.0 – 3.0 Mo
317	S31700	0,08	2.0	1.0	16.0 – 18.0	11.0 – 15.0	0.045	0.03	3.0 – 4.0 Mo
317L	S31700	0,08	2.0	1.0	18.0 – 20.0	11.0 – 15.0	0.045	0.03	3.0 – 4.0 Mo
321	S32100	0,08	2.0	1.0	18.0 – 20.0	9.0 – 12.0	0.045	0.03	Ti= 5x%C min.
347	S34700	0,08	2.0	1.0	28.0 – 26.0	9.0 – 13.0	0.045	0.03	Nb= 10x%C min.

2.1.2 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Os aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente ligas de Cromo e de Carbono que possuem estrutura cristalina cúbica (CCC) (martensítica) no estado endurecido. Eles são ferromagnéticos e endurecíveis pelo calor [1].

Esses materiais são resistentes à corrosão somente nos ambientes menos agressivos. O teor de Cr é geralmente em torno de 11,5 a 18% e o teor de carbono pode ser superior a 1,1%. Os conteúdos de cromo e carbono são equilibrados para assegurar a estrutura martensítica após a tempera [1].

Para aumentar a resistência ao desgaste será necessário aumentar a quantidade de carbonetos e para melhorar a resistência a corrosão deverá ser adicionada pequenas quantidades de Níquel. Os principais tipos de aços inoxidáveis martensíticos estão listados na tabela 2.2 [1].

Tabela 2.2 - Principais aços inoxidáveis martensíticos. Adaptado da ref. [1].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS PRINCIPAIS AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS (% PESO)									
TIPO	Nº UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OUTROS
403	S40300	0.15	1.00	0.50	11.5-13.0	...	0.04	0.03	...
410	S41000	0.15	1.00	1.00	11.5-13.5	...	0.04	0.03	...
414	S41400	0.15	1.00	1.00	11.5-13.5	1.25-2.50	0.04	0.03	...
416	S41600	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	...	0.06	0.15 min.	0.6 Mo
416Se	S41623	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	...	0.06	0.06	0.15 min. Se
420	S42000	0.15 min.	1.00	1.00	12.0-14.0	...	0.04	0.03	...
420F	S42020	0.15 min.	1.25	1.00	12.0-14.0	...	0.06	0.15 min.	0.6 Mo
422	S42200	0.20- 0.25	1.00	0.75	11.5-13.5	0.5-1.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo; 0.75- 1.25 W; 0.15-0.3 V
431	S43100	0.20	1.00	1.00	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04	0.03	...
440A	S44002	0.60- 0.75	1.00	1.00	16.0-18.0	...	0.04	0.03	0.75 Mo
440B	S44003	0.75- 0.95	1.00	1.00	16.0-18.0	...	0.04	0.03	0.75 Mo
440C	S44004	0.95-20	1.00	1.00	16.0-18.0	...	0.04	0.03	0.75 Mo

2.1.3 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas contendo teores de Cr numa faixa de 10,5 a 30%. Alguns tipos podem conter Molibdênio, Silício, Alumínio, Titânio e Nióbio para obter características particulares. As ligas de aços inoxidáveis ferríticos são ferromagnéticas [1].

As suas principais características são a boa ductilidade, boa conformabilidade, resistência à corrosão (especialmente a corrosão sob tensão), mas em alta temperatura aumenta o tamanho de grão e não são endurecíveis por tratamento térmico. Os principais tipos de aços inoxidáveis ferríticos estão listados na tabela 2.3 [1].

Tabela 2.3 - Principais aços inoxidáveis Ferríticos. Adaptado da ref.[1].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS PRINCIPAIS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS (% PESO)									
TIPO	Nº UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OUTROS
405	S40500	0.08	1.00	1.00	11.5-14.5	-	0.04	0.03	0.10-0.30 Al
409	S40900	0.08	1.00	1.00	10.5-17.5	0.50	0.045	0.045	6x%C min-0.75 max Ti
430	S43000	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	-	0.04	0.03	-
430F	S43020	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0	-	0.06	0.15 min.	0.6 Mo
430FSe	S43023	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0	-	0.06	0.06	0.15 min. Se
442	S44200	0.20	1.00	1.00	18.0-23.0	-	0.04	0.03	...
444	S44400	0.025	1.00	1.00	17.5-19.5	1.00	0.04	0.03	1.75-2.50 Mo; 0.025 N; 0.2+4 (%C + %N) min. – 0.8 Max. (Ti + Nb)
446	S44600	0.20	1.50	1.00	23.0-27.0	-	0.04	0.03	0.25 N

2.1.4 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

Os aços inoxidáveis duplex têm uma estrutura mista de ferrita (CCC) e austenita (CFC). A quantidade exata de cada constituinte está em função da composição e do tratamento térmico [1].

As maiores das ligas são projetadas para conter quantidades iguais de cada fase na condição recozida. Os principais elementos de liga são o Cromo e Níquel, mas podem conter Nitrogênio, Cobre, Molibdênio, Silício, e Tungstênio para melhorar certas características de resistência à corrosão [1].

Com relação aos aços inoxidáveis duplex a produção atual é pequena se comparada com a dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, mas é de grande importância, pois tem uma utilização bastante específica e principalmente em indústrias de ponta como indústrias químicas, petrolíferas, de geração de energia e também de papel e celulose, entre outras [1].

Esse tipo de aço tem um comportamento superplástico indicado pelas grandes deformações. Essas deformações podem acontecer sem a formação de estrição em temperaturas próximas a metade da temperatura de fusão dos mesmos [1].

A superplasticidade estrutural é causada pela presença de uma estrutura muito refinada, que é obtida durante a transformação de parte da fase ferrítica para a combinação de estrutura austenítica / ferrítica [1].

Os principais tipos de aços inoxidáveis duplex estão listados na tabela 2.4 [1].

Tabela 2.4 - Principais aços inoxidáveis Duplex. Adaptado da ref.[1].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX (% PESO)									
TIPO	Nº UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OUTROS
329	S32900	0.20	1.00	0.75	23.0-28.0	2.50-5.00	0.040	0.030	1.00-2.00 Mo
SAF 2205	S31803	0,03	2,0	1,0	21-23	5,5	0,03	0,02	2,5-3,5 Mo

2.1.5 AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são ligas de Cromo-Níquel que contêm elementos tais como o Cobre, Titânio e Alumínio. Esses materiais podem ser austeníticos ou martensíticos na condição de recozido [1].

Quando a microestrutura desses aços for basicamente austenítica são frequentemente transformáveis em martensíticos através de tratamentos térmicos tipo sub zero [1].

Normalmente são fáceis de deformar e apresentam ótima resistência à corrosão. São muito utilizados na fabricação de componentes de motores, turbinas e peças para a indústria aeronáutica. Distinguem-se dois tipos de aços endurecíveis por precipitação: os semi - austeníticos e os martensíticos [1].

Os aços inoxidáveis semi - austeníticos são quase integralmente austeníticos após solubilização, coexistindo este constituinte com o ferro gama [1].

Os principais tipos de aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação estão listados na tabela 2.5 [1].

Tabela 2.5 - Principais aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação. Adaptado da ref. [1].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO (% PESO)									
TIPO	Nº UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OUTROS
PH 13-8 Mo	S13800	0.05	0.20	0.10	12.25-13.25	7.5-8.5	0.01	0.008	2.0-2.5 Mo; 0.90-1.35 Al; 0.01 N.
15-5 PH	S15500	0.07	1.00	1.00	14-0-15.5	3.5-5.5	0.04	0.03	2.5-4.5 Cu; 0.15-0.45 Nb.
17-4 PH	S17400	0.07	1.00	1.00	15.5-17.5	3.0-5.0	0.04	0.03	3.0-5.0 Cu; 0.15-0.45 Nb.
17-7 PH	S17700	0.09	1.00	1.00	16.0-18.0	6.5-7.75	0.04	0.04	0.75-1.5 Al.

2.1.6 DIAGRAMAS PARA MEDIÇÃO EMPÍRICA DO TEOR DE FERRITA

Os diagramas foram utilizados para prever o teor de ferrita no depósito da solda de revestimento. O primeiro foi o diagrama de Schaeffler (figura 2.1), e posteriormente os diagramas de Delong e WRC-1992.[1].

O diagrama WCR- 1992 , figura 2.2 representa uma melhoria em relação ao diagrama de Delong e expandiu-se em termos de equivalência de Cromo (Cr-eq) para serem incluídos em metais de solda para aços inoxidáveis duplex tais como EZZ09 –XX e E2553 ~ XX. O diagrama WCR inclui um fator para o Cobre no Níquel equivalente (Nieq) .O diagrama WCR-1992.

Não pode ser aplicado para composições químicas maiores de 0,25 de Nitrogênio, e maior de 10% de Manganês [1].

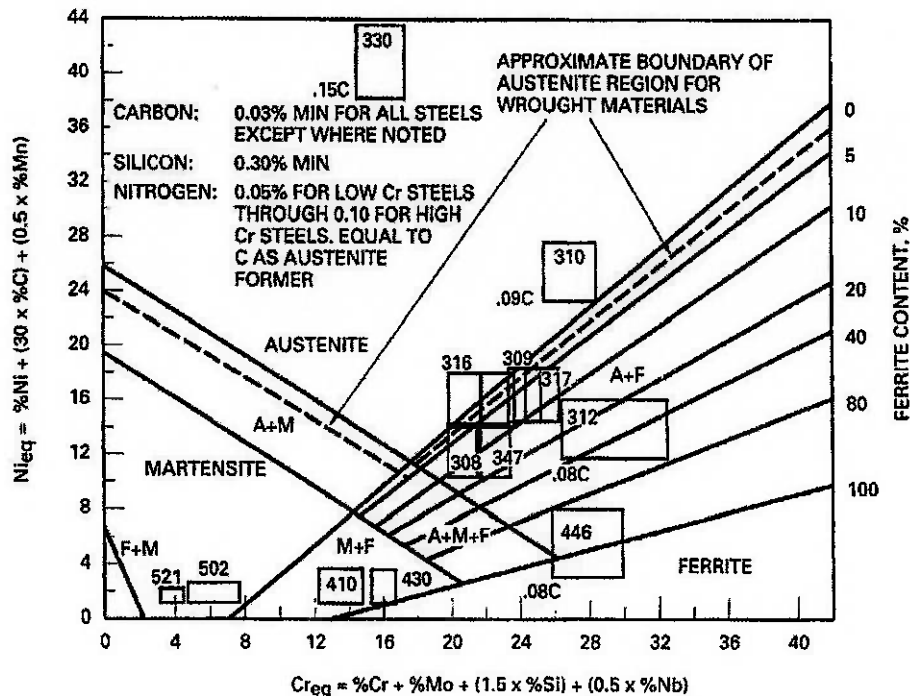


Figura 2.1 - Diagrama de Schaeffler para estimar o teor de ferrita do metal de solda dos aços inoxidáveis [1].

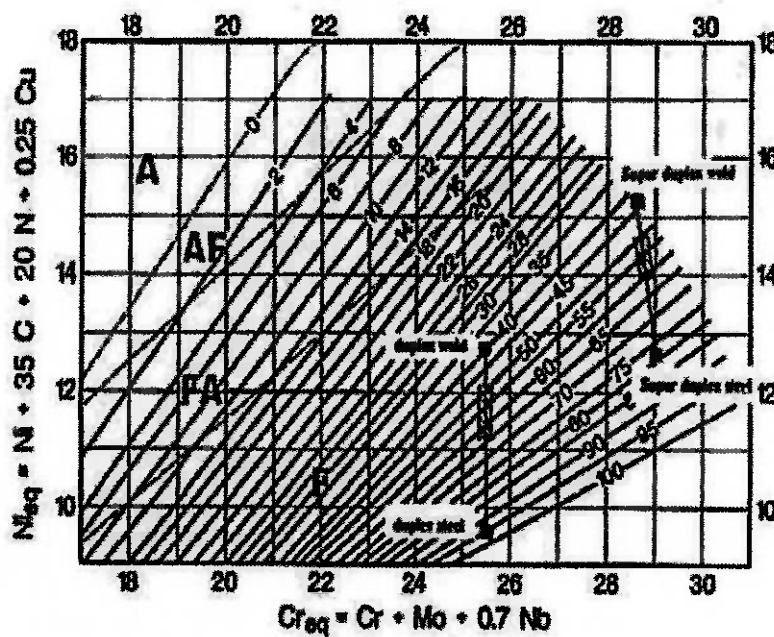


Figura 2.2 - Diagrama WCR-1992 [1].

2.1.7 SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Segundo FOLKHAD [2] os fenômenos que ocorrem na soldagem dos aços inoxidáveis são explicados na constituição do diagrama de equilíbrio de Schaeffler. Para que se estude a propriedade de uma junta soldada de aço inoxidável, e os fenômenos associados que surgem na zona afetada pelo calor (ZAC). A maioria dos aços inoxidáveis são ligas austeníticas de Ferro Cromo-Níquel, sendo a maior representatividade os chamados (18 - 8)

Onde se tem cerca de (18% de Cr e 8% de Ni). Com o conhecimento adequado do diagrama de equilíbrio é possível prever satisfatoriamente as possíveis reações de (18% de Cr e 8% de Ni).

Com o conhecimento adequado do diagrama de equilíbrio é possível prever satisfatoriamente as possíveis reações metalúrgicas que ocorrerão no metal de solda e na zona (ZAC).

No diagrama de equilíbrio Ferro - Cromo, conforme a figura 2.3, o elemento cromo restringe o limite da fase gama (Austenita) à medida que se aumenta o conteúdo de liga até desaparecer completamente com aproximadamente 12% de Cromo. Isso significa que ligas de Fe-Cr com mais de 12% de Cromo não mostram transformação Gama-Alfa.

Diferente do Cromo, o Níquel, conforme a figura 2.4 não restringe, mas expande substancialmente a área da austenítica.

Com um aumento de teor de Níquel, a área de transformação Gama - Alfa é deslocada para temperaturas mais baixas, cerca de 900°C para 350°C.

A estrutura austenítica é estabilizada de tal modo que qualquer queda de temperatura a desestabiliza, buscando sempre se igualar a temperatura ambiente, com taxas rápidas de resfriamento. Os aços inoxidáveis austeníticos ao Cromo Níquel são baseados nesse efeito [2].

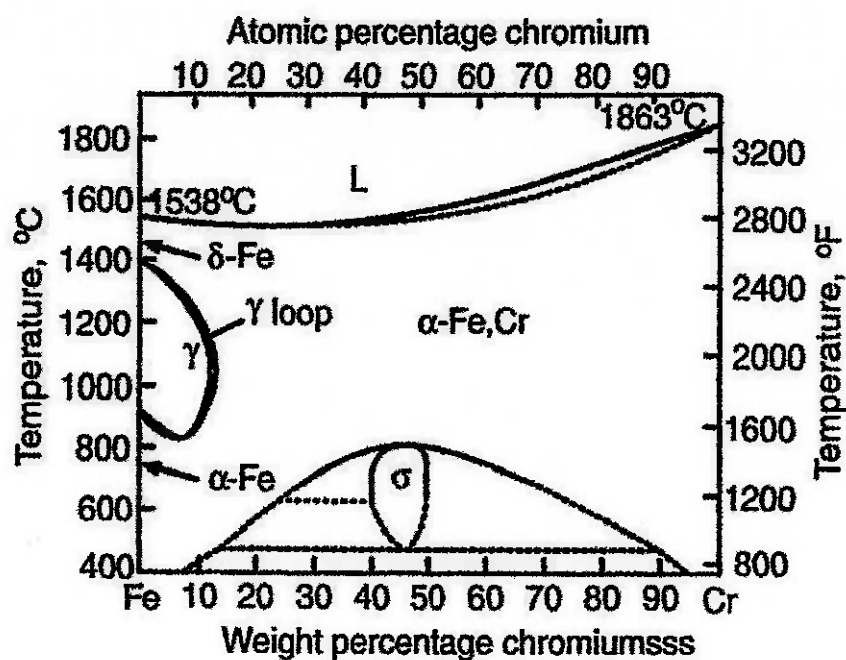


Figura 2.3 - Diagrama de fase, mostrando a estabilização da ferrita (Fe-Cr) [3].

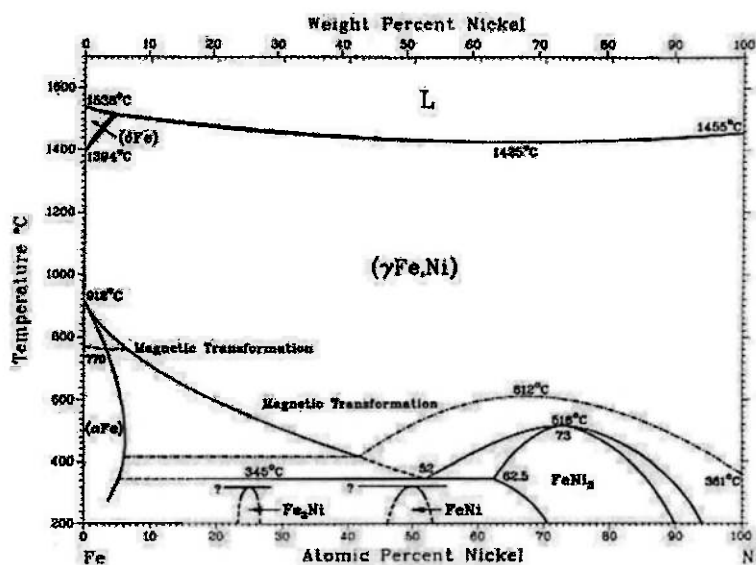


Figura 2.4 - Diagrama de fase mostrando estabilização da austenita (Fe - Ni) [3].

2.1.8 DIAGRAMA DE SCHAEFFLER

O diagrama de Schaeffler é um valioso instrumento para a avaliação de metal de adição. Ele permite estimar com antecedência a composição química e a estrutura da solda de um aço ligado. Permite também escolher consumíveis apropriados para cada soldagem, mesmo sendo heterogenia de aço ao carbono com aço inoxidável. O diagrama de Schaeffler é tão importante para os aços inoxidáveis como o diagrama Fe-C é para os aços ao carbono.

A austenita é uma estrutura austenítica típica (CFC), de grande tenacidade, mas sujeita a trincas a quente [2].

A ferrita é uma estrutura ferrítica típica (CCC), é também uma estrutura austeno - ferrítica de grande importância [2].

Martensita uma estrutura dura e pouco tenaz que dependendo do teor de carbono é sujeita a trincas a frio [2].

Em um sistema de coordenadas onde os eixos representam o efeito dos elementos alfa-gênicos e gama-gênicos, locaram-se os pontos referentes aos materiais envolvidos, encontrando as respectivas estruturas a temperatura ambiente conforme figura 2.5 [2].

Na influência dos elementos de liga na geração da ferrita e da austenita, Shaeffler mostrou que outros elementos agiam como o Cromo e o Níquel em maior ou menor escala.

Seu grande trabalho foi pesquisar a influência de cada um. Verificou-se que todos eles podiam se encaixar em uma das duas categorias, alfa-gênicos ou Gama-gênicos [2].

Entre os elementos Gamagênicos, o Níquel (Ni) é o Gamagênico principal, o Carbono (C) usado em pequenas percentagens raramente ultrapassa 0.30% e raramente situa-se a menos de 0.03%.

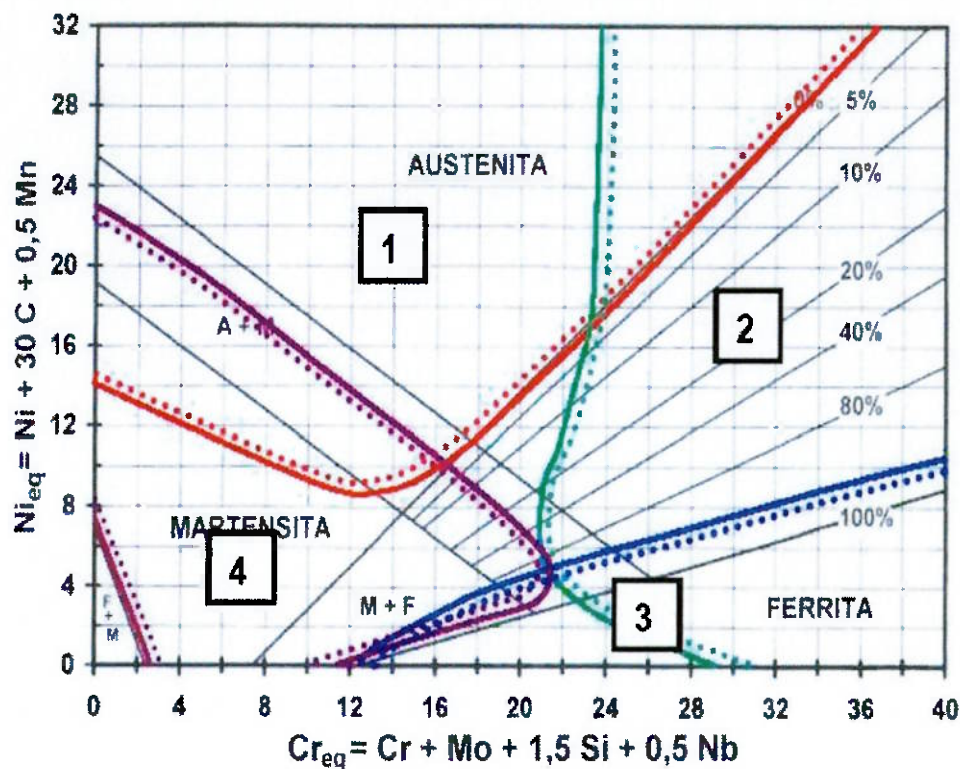


Figura 2.5 - Diagrama de Schaeffler mostrando as regiões de desenvolvimento de problemas típicos na soldagem de aços inoxidáveis [2].

O Nitrogênio (N) com teores maiores que 0,07% podem ser considerados como elemento de liga que tem efeito análogo ao Carbono. Pode ser usado ou para substituir parcialmente o Ni ou para aumentar a resistência dos aços (18-10), sem o inconveniente da precipitação de carbonetos que o carbono oferece [2].

O Manganês pode substituir uma parcela considerável do Ni para conseguir na temperatura ambiente manter a estrutura austenítica, porém com

teores maiores que 6%, pode se comportar como Alfacênico, exigindo maior teor de Ni para contrabalançar seu efeito [2].

O Cobre parece ser levemente Gamagênico. Pode melhorar a resistência em certos meio de corrosão, assim como a resistência à fluência [2].

Entre os elementos alfacênicos o Cromo (Cr) é o principal, o Silício possui uma influência 50% maior que o cromo até o teor de 1%, pode ser usado como elemento de liga nos aços refratários ou para melhorar a resistência dos aços (18-10), em casos de corrosão por tensão.

O Molibdênio melhora a resistência ao *pitting*, corrosão por frestas dos aços austeníticos [2].

O Tungstênio melhora a resistência mecânica a temperaturas elevadas, o Nióbio e Titânio usados em teores pequenos, são alfacênicos e contribuem para fixar o carbono, evitando a precipitação de carbonetos de cromo no contorno de grão [2]. A seguir a fórmula do Níquel equivalente;

$$(Ni\ eq. = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn).$$

O conceito de Níquel equivalente, é a soma dos teores dos elementos gamagênicos, multiplicados pelo fator que expressa sua influência relativamente ao níquel [2]. A seguir a fórmula do Cromo equivalente.

$$Cr\ eq = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb.$$

Analogamente o Cromo equivalente será a soma ponderada dos elementos alfacênicos [2].

A parte mais importante do diagrama é a região austeno - ferrítica onde se encontram várias curvas que expressam o teor de ferrita na estrutura.

Essas linhas são de grande utilidade, ver diagrama de Schaeffler na escolha da composição ideal para a zona fundida [2].

A partir da indicação dos campos, no diagrama de Schaeffler, podem-se demarcar regiões com problemas característicos.

CAMPO 1 : Zona da trinca a quente.

Esse campo engloba basicamente as composições austeníticas. O problema que pode ocorrer nas soldagens de ligas cuja composição esteja neste campo é a trinca a quente, que ocorre em temperaturas acima de 1250°C. A explicação deste fenômeno é que nessas ligas há possibilidade de formação de fases agregadas de menor resistência mecânica. Esse fato aliado a tensões de contração oriundas de uma soldagem é suficiente para trincar o cordão de solda em temperaturas elevadas. Ocorre basicamente no cordão fundido, embora possa acontecer na ZAC [2].

CAMPO 2 : Zona da fase sigma.

Esse campo engloba todas as composições de ligas que têm possibilidade de após longo tempo de permanência a temperaturas na faixa de 500-900°C, fazerem surgir uma fase chamada 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, mas também pode ser formada na austenita. Sendo a proporção na fase de aproximadamente 1 átomo de Fe para um átomo de Cr, espera-se que somente ligas de alta percentagem de

cromo sejam susceptíveis. Entretanto, devido a possibilidade de difusão, aliada ao fato de haver regiões micros segregadas de composições químicas diversas, existem ocorrências de fase sigma em ligas com até 20% de Cromo, austeníticas ou ferríticas [2].

CAMPO 3: Zona de crescimento do 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 do que 1150°C.

Esse crescimento irreversível dos grãos é mais acentuado na zona afetada (ZAC), resultando fragilização. Procura-se evitar a soldagem desses aços. O uso mais generalizado desses aços é na soldagem de revestimento de chapas, muito comum na indústria petrolífera e petroquímica porque a fragilidade do revestimento é compensada pela ductilidade da chapa base [2].

CAMPO 4: Zona de trinca a frio.

Esse campo abrange as estruturas martensíticas e parte das estruturas mistas martensíticas - austeníticas e martensíticas - ferríticas.

São normalmente os aços temperados e revenidos, com teores mais altos de Carbono, acima de 0,3% e os revestimentos duros que são problemas desse campo [2].

A trinca a frio abaixo de 150°C ocorre nesses aços devido A coexistência de três fatores: Estrutura metalúrgica martensítica, Tensões e hidrogênio [2].

A trinca normalmente se localiza na zona afetada pelo calor (ZAC) da junta soldada, mas pode ocorrer no cordão de solda [2].

REGIÃO CENTRAL: "Sem problemas."

No centro do diagrama existe uma região que não pertence a nenhum dos quatro campos. As composições químicas que pertencem a essa região indicam que a liga está livre dos quatro efeitos citados [2].

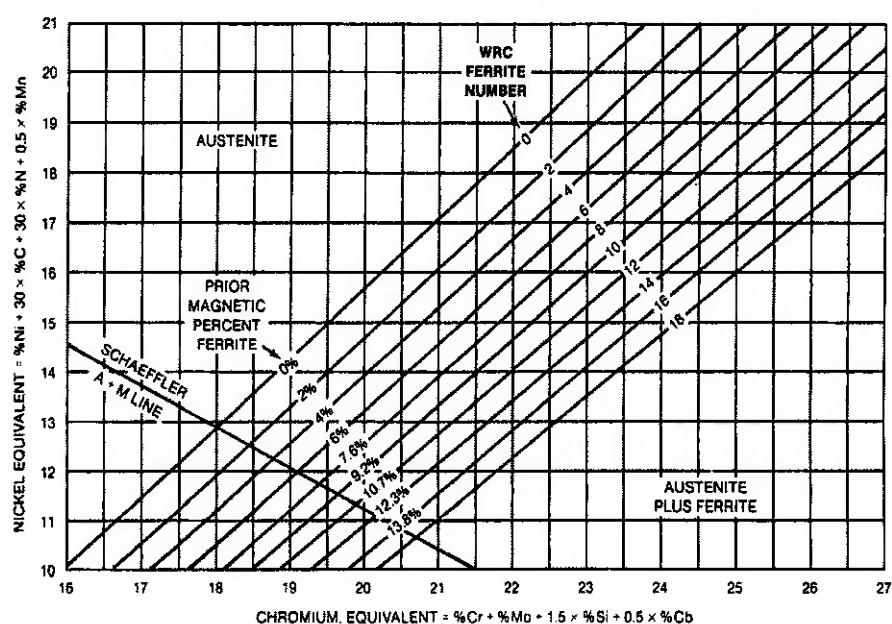
O objetivo é tentar fazer com que a composição química da zona fundida caia nesta região, embora esse procedimento não resolva a situação para a zona afetada pelo calor (ZAC), cuja composição química é a do metal de base. Os parâmetros que devem ser controlados são: escolha do metal de adição e controle da diluição pela seleção dos processos de soldagem [2].

2.1.9 TEOR DE FERRITA

O teor de ferrita do metal de solda de revestimento de aço inoxidável austenítico deve estar compreendido de 3 FN e 9 FN após soldagem, exceto para aço inox AISI 347 em que o teor de ferrita deve estar compreendido de 5 FN e 9 FN. No caso de TTAT, o teor de ferrita deve ser medido antes deste [2].

2.1.9.1 CONTROLE DE FERRITA

A quantidade de ferrita contida nas soldas pode ser calculada pela composição química do depósito de solda através de vários diagramas de constituição, como por exemplo: WCr-1988 (figura 2.6), Espy (figura 2.7), DeLong (figura 2.8).



Calculate the nickel and chromium equivalents from the weld metal analysis. If nitrogen analysis of the weld metal is not available, assume 0.06% for GTA and covered electrode, or 0.08% for GMA weld metals. If the chemistry is accurate the diagram predicts the WRC Ferrite Number within plus or minus 3 in approximately 90% of the tests for the 308, 309, 316 and 317 families.

Figura 2.6 - Diagrama WRC 1988, para metal de solda para aços inoxidáveis [3].

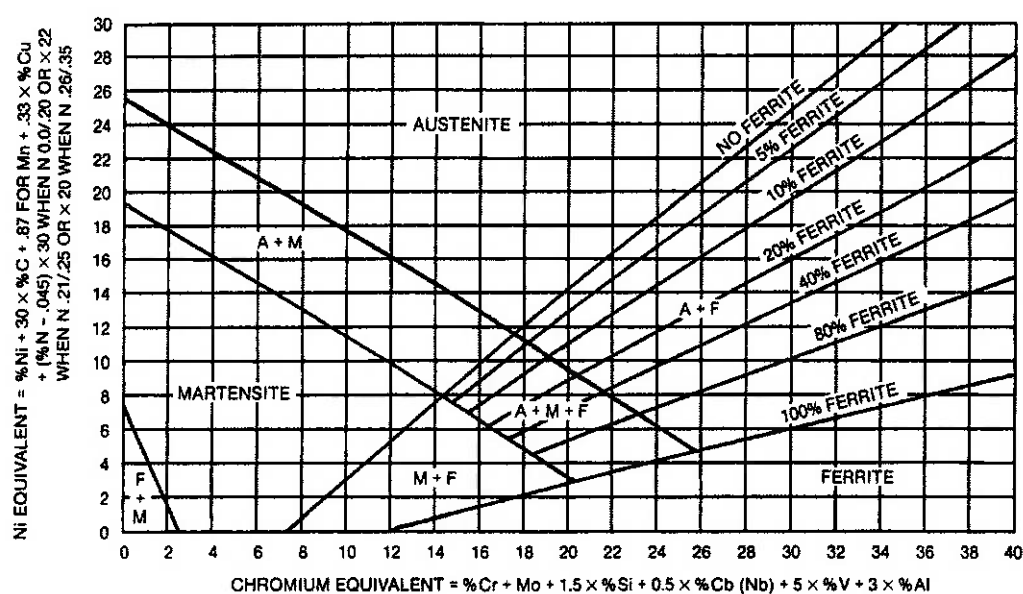


Figura 2.7 - Diagrama ESPY, porcentagem de ferrita do metal de solda de aços inoxidáveis [1].

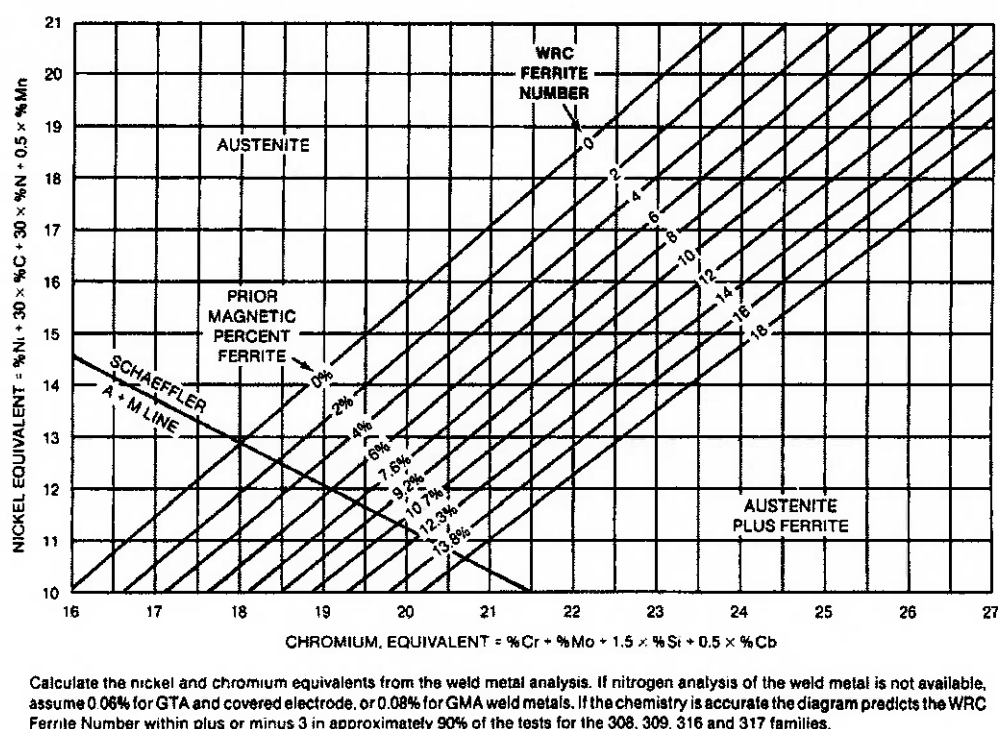


Figura 2.8 - Diagrama de Delong (Fn), metal de solda de aços inoxidáveis [2]

2.1.10 DIFERENÇA ENTRE OS DIAGRAMAS:

O diagrama de WRC-1988 (figura 2.6), prevê a quantidade de ferrita em número (FN), é o mais novo dos diagramas citados, melhor aplicável para os aços inoxidáveis série 300 e duplex [2].

O diagrama de Espy (figura 2.7), calcula a porcentagem de ferrita dos depósitos de solda em vez de FN, aplicável para os aços inoxidáveis da série 300 [1-2]

O diagrama de Delong, (figura 2.8), é uma modificação do diagrama de Schaeffler, onde prevê o número de ferrita FN até o máximo de 18FN. É o diagrama mais preciso para a previsão de ferrita, melhor aplicado nos aços inoxidáveis da série 300 [2-3]

2.1.11 PROPRIEDADES DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

2.1.11.1 Propriedades mecânicas.

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos, são moderadas, e comparadas aos aços doce elas dependem, essencialmente da condição do material, ou seja, se ele se encontra no estado recozido ou encruado (um quarto duro, meio duro, três quartos duro ou totalmente duro).

Essas propriedades dependem igualmente da forma do produto acabado ou sem i- acabado (barras, fios, tiras, chapas etc.), e obviamente da composição química. Como esses aços não são endurecíveis por tratamento térmico, o aumento da dureza e resistência mecânica só pode ser obtido por encruamento, através de trabalho a frio, conforme a tabela 2.6 [1-2].

Os aços inoxidáveis contendo Molibdênio (Mo) são melhores na resistência a fluência, (Redução da resistência mecânica com o aumento da temperatura) [1-2].

Tabela 2.6 - Propriedades mecânicas do aço austenítico tipo AISI 304, em função do encruamento. Adaptado da ref. [1].

Grau do encruamento	Redução de secção aproximada, %	Limite de resistência à tração		Limite de escoamento		Alongamento mínimo, em 25 mm %
		Kgf/mm ²	MPa	kgf/m ²	MPa	
¼ duro	10 a 15	88	860	53	520	25
½ duro	20	105	1030	77	760	15
¾ duro	30	123	1210	95	930	10
totalmente encruado (duro)	40	130	1280	98	960	8
Os valores de alongamento são para espessura superior a 38 mm.						

2.1.12 PROPRIEDADES FÍSICAS

Foi feito um estudo sobre outras características dos aços inoxidáveis austeníticos tais como: densidade (g/cm³), carga axial E (GPa), Coef. expansão térmica (10⁻⁶m/m/oC), condutividade térmica (100oC) (W/m.K) e Cal. específico (0oC a 100oC) (J/kg.K), foi feita uma comparação entre os aços inoxidáveis austenítico, ferrítico, martensítico com o aço Carbono, conforme tabela 2.3.[1].

Tabela 2.7 - Propriedades físicas dos aços inoxidáveis. em comparação com aço ao Carbono. Adaptado da ref. [1]

PROPRIEDADE	AUSTENÍTICOS	FERRÍTICOS	MARTENSÍTICOS	AÇO CARBONO
Densidade (g/cm ³)	7,8 -8,0	7,8	7,8	7,8
E (GPa)	193 -200	200	200	200
Coef. expansão térmica (10 ⁻⁶ m/m/°C)	17 -19,2	11,2 -12,1	11,6 -12,1	11,7
Condutividade térmica (100°C) (W/m.K)	18,7 -22,8	24,4 -26,3	28,7	60
Cal. específico (0°C a 100°C) (J/kg.K)	69 -108	59 -67	55 -72	12

2.1.13 PROPRIEDADES A CORROSÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos mais comuns, como os tipos, AISI 302, 304 e 316 proporcionam resistência à corrosão geral na atmosfera, em muitos meios aquosos, na presença de alimentos, e na oxidação de ácidos, tais como ácido nítrico em temperatura ambiente ou moderada.

Com o aumento da temperatura, estes aços tendem a sofrer um processo de sensitização, (Perda de carbonetos de cromo no contorno de grão austenítico).

Nos aços austeníticos a sensitização ocorre entre as temperaturas de 450 °C a 850 °C.

O aço quando sensitizado fica susceptível à corrosão intergranular, a qual acontece principalmente nos meios ácidos, exemplo de estrutura sensitizada, vide figura 2.9 [4 -16].

Para prevenir a sensitização utiliza-se os aços inoxidáveis, tipos AISI 321 e 347, que contem na composição química os estabilizadores Titânio (Ti) e Nióbio (Nb) respectivamente.

Para reverter o processo de sensitização utiliza-se o tratamento térmico de solubilização.

O tratamento de solubilização, é uma espécie de têmpera que visa garantir a manutenção da estrutura austenítica a temperatura ambiente.

Consiste em aquecer o aço a uma temperatura suficientemente elevada para remover as modificações estruturais resultantes dos processos de soldagem, dissolvendo os carbonetos presentes (Sobretudo os de Cromo) e, após o tempo necessário a temperatura, resfriar rapidamente. O resfriamento deve ser rápido para evitar a precipitação de carbonetos, a qual acontece na faixa de 450 - 850°C. A temperatura do tratamento térmico de solubilização está descrita na tabela 2.8. [6]

Os aços inoxidáveis austeníticos para ambientes corrosivos tais como H₂ e H₂S, tem a dureza controlada para evitar corrosão sob tensão [12].

Para correção da falha ilustrada na figura 2.9, foi executado um tratamento térmico de solubilização, para dissolver os carbonetos de Cromo, o resultado está ilustrado na figura 2.10 [4-16].

Tabela 2.8 - Faixas de temperaturas para solubilização de alguns aços inoxidáveis austeníticos . Adaptado da ref. [6].

Tipo	Temperatura, °C
201, 202	1010/1120
301,302, 302B	
303, 303 Se	1010/1120
304, 305, 308	1010/1120
304 L	1010/1120
309, 309 S	1040/1120
310, 310 S	1040/1065
314	1040/1120
316	1040/1120
317	1065/1120
316 L, 317 L	1040/1105
321	955/1065
347, 348	980/1065

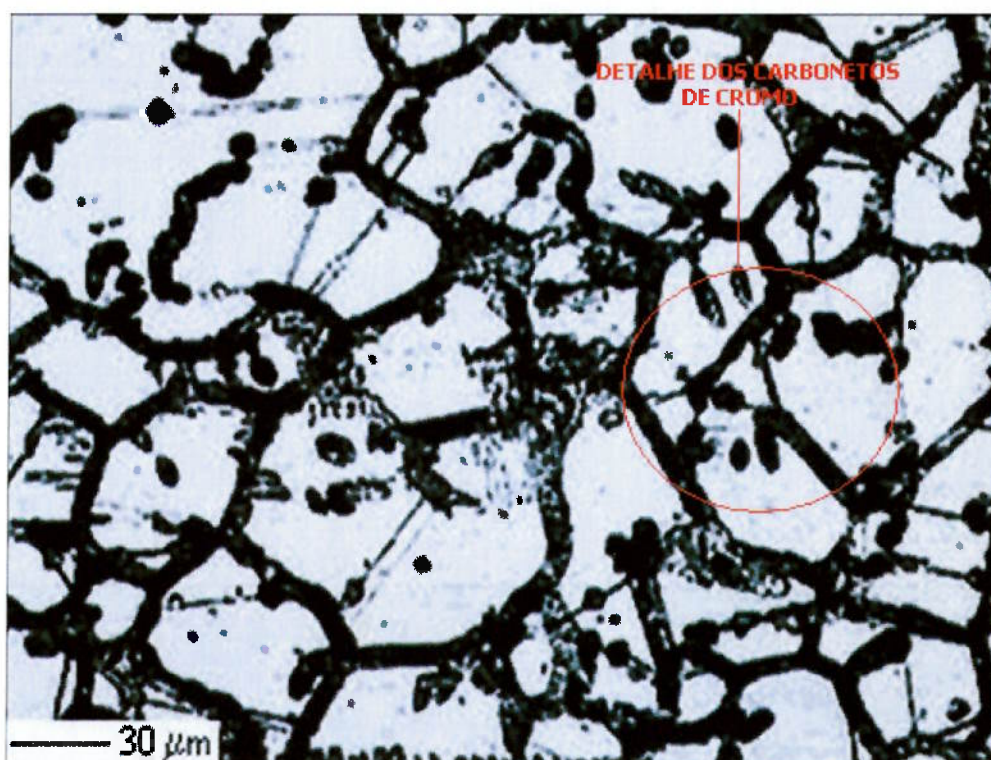


Figura 2.9 - Aço AISI 304, Detalhe da Estrutura, Sensitizada, com visível precipitação de carbonetos de cromo, no contorno do grão austenítico, e regiões com o contorno totalmente deteriorado [4].



Figura 2.10 - Aço AISI 304, detalhe da estrutura solubilizada, contorno de grãos bem definidos sem precipitação de carbonetos [4].

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM UTILIZADOS NO REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇOS

2.2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA-MIG

O processo de soldagem Plasma – Mig pode ser utilizado pela indústria na soldagem de revestimentos, resistentes à corrosão e ou desgastes, com bons resultados [7].

2.2.2 SOLDAGEM DE REVESTIMENTO RESISTENTE A CORROSÃO PELO PROCESSO DE ARAME TUBULAR COM PULSAÇÃO TÉRMICA

O processo de soldagem com arame tubular com pulsação térmica aplicado na deposição de material aço inoxidável austenítico sobre um substrato de material de aço carbono ou baixa liga, teve a sua eficácia aprovada através de experimentos [8].

2.2.3 ESPECIFICAÇÃO DE ELETRODOS.

A Sociedade Americana de Soldagem (AWS - American Welding Society) criou um padrão para a identificação dos eletrodos revestidos que é amplamente aceito [9].

Entre estas especificações as mais populares são as utilizadas para aço Carbono (AWS A 5.1), as utilizadas para aços de baixa liga (AWS A 5.5), e as utilizadas para aços inoxidáveis (AWS A 5.4) [9].

A primeira (AWS A 5.1), tem uma forma simples de ser interpretada que pode ser vista na tabela 2.9 a seguir. A especificação para aços de baixa liga (AWS A 5.5) é muito semelhante a anterior, utiliza exatamente a mesma base e adiciona no fim um hífen e alguns dígitos (entre um e três podendo ser letras e números ou somente letras) que indicarão a presença e quantidade do elemento de liga adicionado no revestimento do eletrodo [9].

Metais de adição para revestimento depositado por soldagem (weld overlay), em chapa base de aço carbono ou aço baixa liga em equipamentos que não requerem tratamento térmico. Estão descritos na tabela 2.10 [10].

Tabela 2.9 - Especificação para eletrodos revestidos. Adaptado da ref. [9].

ESPECIFICAÇÕES PARA ELETRODOS REVESTIDOS	
AWS 5.1	AÇOS AO CARBONO
AWS 5.3	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS
AWS 5.4 n	AÇOS INOXIDÁVEIS
AWS 5.5	AÇOS BAIXA LIGA
AWS 5.6	COBRE E SUAS LIGAS
AWS 5.11	NÍQUEL E SUAS LIGAS
AWS 5.12	REVESTIMENTO (ALMA SOLIDA_)
AWS .15	FERROS FUNDIDOS
AWS 5.21	REVESTIMENTO (ALMA TUBULAR COM CARBONETOS DE TUNGSTÊNIO)

Tabela 2.10 - Metais de adição para revestimento depositado por soldagem (weld overlay), em chapa base de aço carbono ou aço baixa liga em equipamentos que não requerem tratamento térmico. Adaptado da ref. [10].

Tipo de material do revestimento desejado	Especificação AWS	Processo SMAW/GTAW	
		Classificação AWS	
		Camada de amanteigamento (ver Nota 3)	Camada de acabamento (ver Nota 3)
405/410S	A5.11/A5.14/ A5.4/ A5.9	E NiCrFe-2/3. ER NiCr-3 E/ER 309/309L	E NiCrFe 2/3. ER NiCr-3 E/ER 309/309L
430	A5.11/A5.14/ A5.4/ A5.9	E NiCrFe-2/3. ER NiCr-3 E/ER 309/309L (E/ER 430)	E NiCrFe-2/3. ER NiCr-3 E/ER 309/309L (E/ER 430)
410 (Nota 1)	A5.11/A5.14/ A5.4/ A5.9	E NiCrFe-2/3. ER NiCr-3 E/ER 309/309L (E/ER 410 / 410NiMo))	E NiCrFe-2/3. ER NiCr-3 E/ER 309/309L (E/ER 410 / 410NiMo))
304	A5.4/ A5.9	E/ER 309/309L	E/ER 309/309L
304L	A5.4/ A5.9	E/ER 309L	E/ER 308L
316/317	A5.4/ A5.9	E/ER309LMo/309Mo	E/ER 316L/317L
316L	A5.4/ A5.9	E/ER309LMo	E/ER 316L/317L
317L	A5.4/ A5.9	E/ER309LMo	E/ER 317L/385
321/347	A5.4/ A5.9	E/ER309L/309Nb	E/ER 347
904L	A5.11/A5.14/ A5.4/ A5.9	E/ER 309 Mo//NiCrMo3	E/ER 385/NiCrMo-3
Duplex	A5.11/A5.9	E/ER 309LMo	E/ER 2595
Alloy 200(Ni)	A5.11/A5.14/	E/ER Ni-1	E/ER Ni-1
Alloy 400(Ni-Cu)	A5.11/A5.14/	E/ER Ni-1 / NiCu-7	E/ER NiCu-7
Alloy 600/800(NiCrFe)	A5.11/A5.14	E NiCrFe-2, ER NiCr-3	E NiCrFe-2, ER NiCr-3
Hastelloy C-276	A5.11/A5.14	E/ER NiCrMo-4	E/ER NiCrMo-4
Alloy 625(NiCrMo)	A5.11/A5.14	E/ER NiCrMo-3	E/ER NiCrMo-3
Cu-Ni (Nota 2)	A5.11/A5.14/	E/ER Ni-1	E/ER Ni-1 NiCu-7
Bronze alumínio (Nota 2)	A5.6/ A5.7	(E/ERCuAl-A2)	(E/ERCuAl-A2)

NOTA 1 Necessita preaquecimento mínimo de 150 °C, independente da espessura do substrato.

NOTA 2 Para o bronze alumínio a temperatura de preaquecimento varia de 150 °C a 250 °C. Para o revestimento da liga Cu-Ni, a temperatura de preaquecimento da primeira camada empregando consumível E/ER Ni-1 não deve ultrapassar 175 °C, para as demais camadas com consumível AWS E/ER NiCu-7 a temperatura interpasse não deve ultrapassar 65 °C.

NOTA 3 Independente da quantidade de camadas (amanteigamento ou acabamento) a composição química final do revestimento deve atender à composição indicada para a camada de acabamento.

2.2.4 PERFIL GEOMÉTRICO DO CORDÃO DE SOLDA DE REVESTIMENTO

A principal diferença da soldagem de revestimento em relação as aplicações convencionais de soldagem, diz respeito a geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais em que é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão de solda (L), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D) [5].

A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo permita recobrir a maior área possível com menor número de passes, um perfil geométrico ideal é mostrado na figura 2.11.

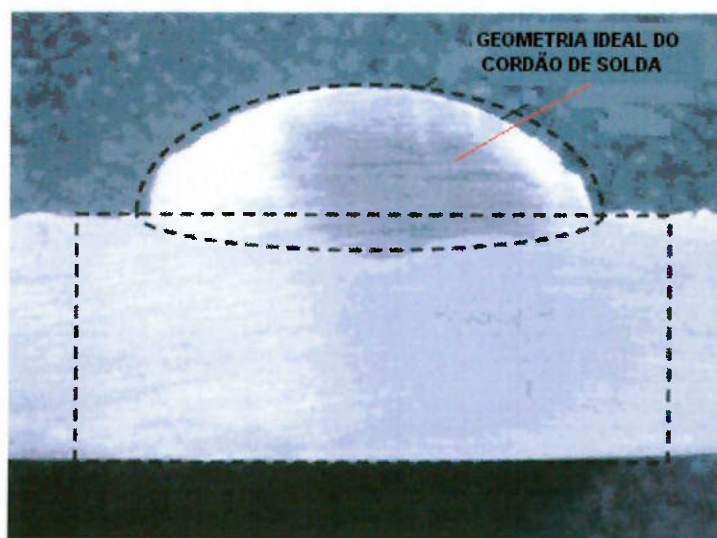


Figura 2.11 - Geometria ideal para cordão de solda de revestimento [5].

2.2.5 CONTROLE DA DILUIÇÃO

A diluição é definida conforme a Figura 2.13 - Menor difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função da menor penetração e diminuição do nível de diluição [5].

como a relação entre a área de penetração e a área total da seção transversal do cordão de solda.

Assim o aumento da penetração provoca um aumento da área de penetração e esta, conseqüentemente, aumenta o nível de diluição. No caso da união de materiais diferentes, o aumento da diluição faz com que exista maior difusão entre elementos presentes na composição química dos respectivos materiais. A união de materiais com composição química diferentes tende a difundir os elementos entre o metal base e do metal de adição, que pode resultar na formação de novos compostos conforme as Figura 2.13 - Menor difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função da menor penetração e diminuição do nível de diluição [5].

Desta forma o aumento da penetração e conseqüentemente da diluição, faz com que a região de contato entre os materiais também aumente, resultando em maior difusão entre os elementos [5].

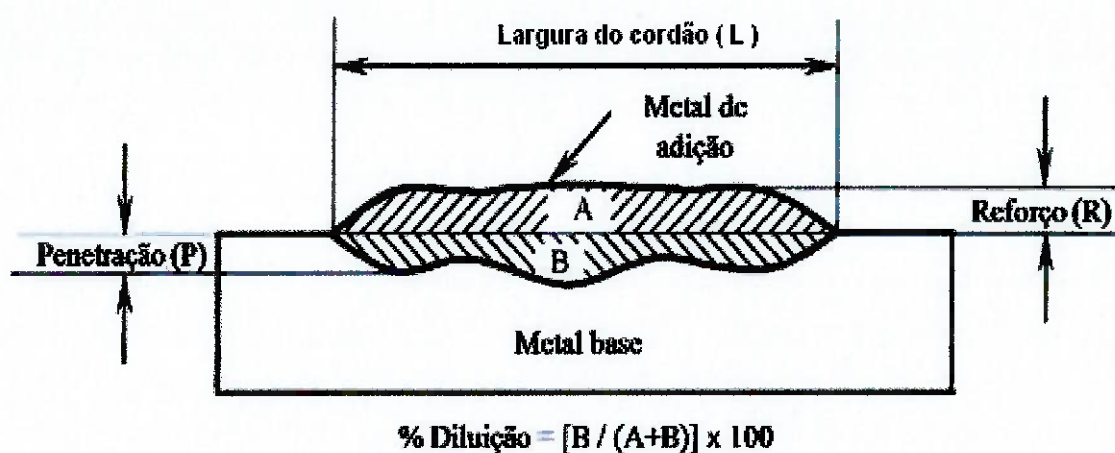


Figura 2.12 - Geometria ideal para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 50% [5].

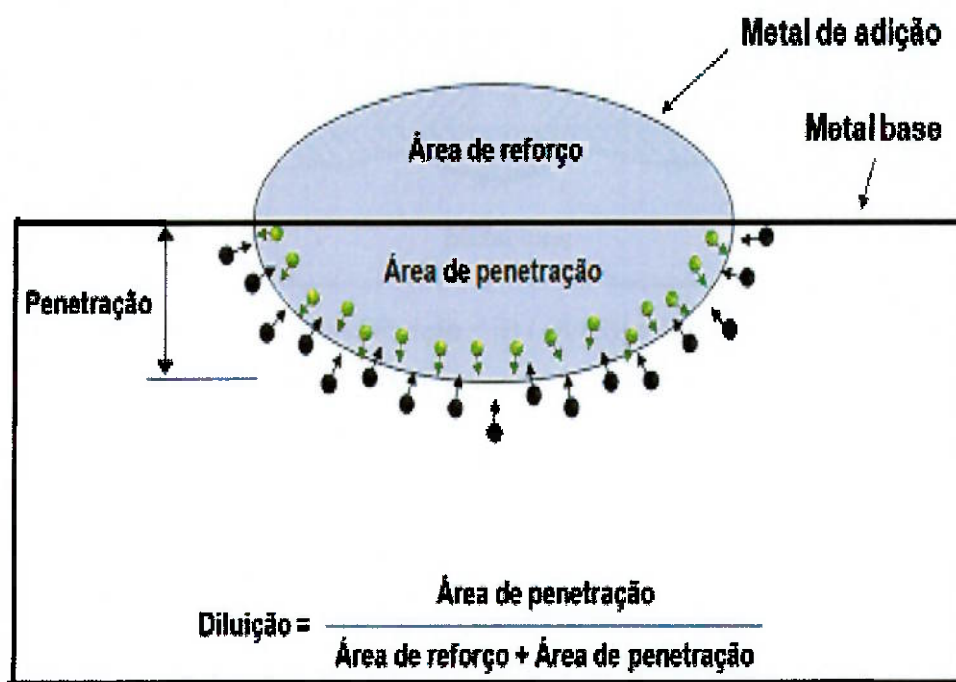


Figura 2.13 - Menor difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função da menor penetração e diminuição do nível de diluição [5].

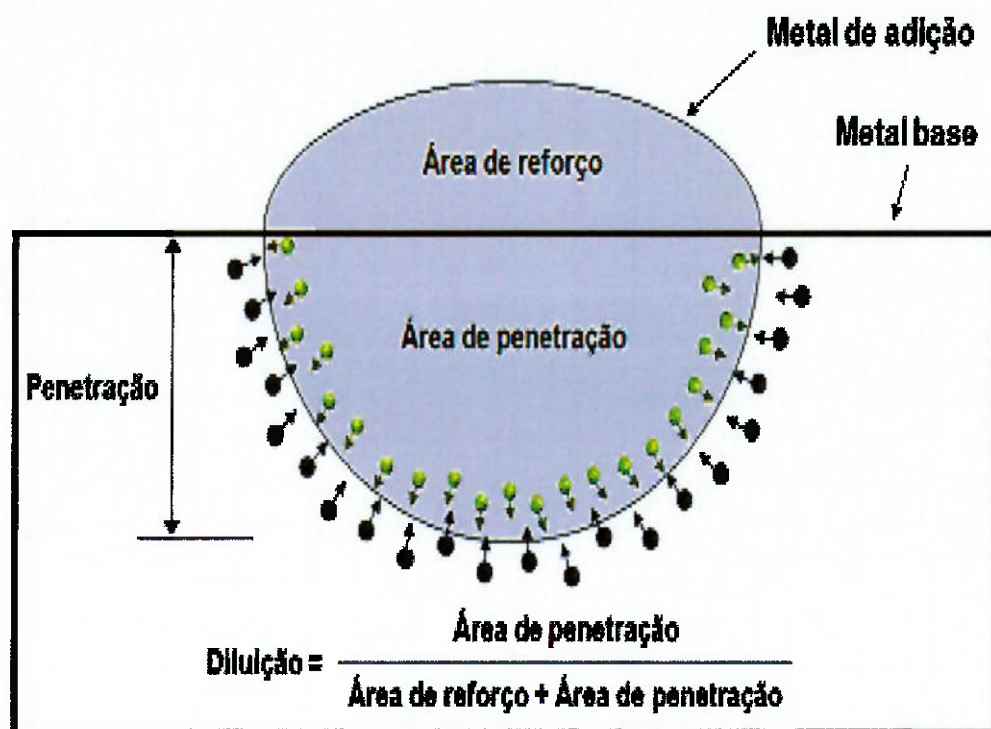


Figura 2.14 - Maior difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função da maior penetração e aumento do nível de diluição [5].

3. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito da polaridade na soldagem de revestimento de chapas de aço carbono por ligas de aços inoxidáveis e qualificar um procedimento de soldagem. Para realizar tais objetivos serão utilizados ensaios de dobramento, dureza, análise química e a caracterização metalográfica das juntas soldadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 METAL DE BASE

O metal de base utilizado foi um aço carbono ASTM A36 com dimensões de 25,0 mm de espessura, 130,0 mm de largura e 250,0 mm de comprimento. A composição química e a resistência mecânica estão descritas nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Composição química especificada pela norma ASTM para o metal de base A36 [13].

Elemento Químico	Valor (%)
C máx.	0,25
Mn	0,80 a 1,20
P máx.	0,04
S máx.	0,05
Si	0,15 a 0,40

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas especificada pela norma ASTM para o metal de base A36 [13].

Propriedades Mecânicas	Valor
Limite de Escoamento min. (Mpa)	250
Limite de Resistência min. (Mpa)	400-550
Alongamento min. (%)	20

4.2 CONSUMÍVEL UTILIZADO NA SOLDAGEM

Todos os consumíveis utilizados na execução da soldagem dos corpos de prova são fabricados no Brasil.

4.2.1 CONSUMÍVEL UTILIZADO PARA TRANSIÇÃO ENTRE O METAL DE BASE E O METAL DE REVESTIMENTO

O consumível de soldagem utilizado para a realização da camada de transição entre o metal de base e o metal de revestimento foi o eletrodo revestido ER 309L com 3,2 mm de diâmetro. Este é classificado e especificado pela norma AWS A5.9.

Nas tabelas 4.3 e 4.4 podem-se observar a composição química e as propriedades mecânicas dos eletrodos revestidos utilizados.

Tabela 4.3 - Composição química do consumível ER 309L utilizado na camada de transição [9].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA ER 309L	
ELEMENTO QUÍMICO	VALOR
C	0,03
Cr	23,0-25,0
Ni	12,0 –14,0
Mo	0,75
Mn	1,0 - 2,5
P	0,03
S	0,03
Cu	0,75

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do consumível ER 309L utilizado na camada de transição [10].

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALOR
Limite de Resistência à Tração (Ksi)	75
Limite de Resistência à Tração (MPa)	520
Alongongamento min. (%)	30

4.2.2 CONSUMÍVEL UTILIZADO PARA REVESTIMENTO DA CAMADA DE TRANSIÇÃO

O consumível de soldagem utilizado para a realização das camadas finais de revestimento sob a camada de transição foi o eletrodo revestido ER 309L com 3,2 mm de diâmetro. Este é classificado e especificado pela norma AWS A5.9.

Nas tabelas 4.5 e 4.6 podem-se observar a composição química e as propriedades mecânicas dos eletrodos revestidos utilizados.

Tabela 4.5 - Composição química do consumível ER 316L utilizado nas camadas finais de revestimento [9].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA ER 316L	
ELEMENTO QUÍMICO	VALOR
C	0,3
Cr	18,0-20,0
Ni	11,0-14,0
Mo	2,0-3,0
Mn	1,0-2,5
Si	0,65-1,0
P	0,03
S	0,03
Cu	0,75

Tabela 4.6 - Propriedades mecânicas do consumível ER 316L utilizado nas camadas finais de revestimento [9].

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALOR
Limite de Resistência a Tração (Ksi)	70
Limite de Resistência a Tração (MPa)	490
Alongamento min. (%)	30

4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM

4.3.1 EXPERIMENTOS

Foram utilizados dois (2) corpos de prova para realizar os experimentos. Um corpo de prova foi denominado experimento 1 e o outro denominado experimento 2.

Em cada experimento foi executada a soldagem com o mesmo processo e com diferentes polaridades que são descritos na tabela 4.7. Os corpos de prova para as análises químicas e os ensaios de propriedades mecânicas foram retirados de cada experimento.

Tabela 4.7 - Descrição das polaridades utilizadas em cada experimento e do tipo de identificação utilizado neste trabalho.

IDENTIFICAÇÃO	CORPO DE PROVA	PROCESSO DE SOLDAGEM	CAMADA	CONSUMÍVEL	POLARIDADE
CP1	EXPERIMENTO 1	ELETRODO REVESTIDO	TRANSIÇÃO	ER 309L	CC -
			REVESTIMENTO	ER 316L	CC -
CP2	EXPERIMENTO 2	ELETRODO REVESTIDO	TRANSIÇÃO	ER 309L	CC +
			REVESTIMENTO	ER 316L	CC +

4.3.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

4.3.2.1 NORMA API 6A.

Todos os experimentos realizados visam a qualificação de um procedimento de soldagem baseado na norma API 6A "Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment" [12]. Porém, com intuito de realizar outras comparações também foi executado os ensaios de resistência a corrosão, caracterização metalográfica da junta soldada e medição da fração volumétrica de ferrita delta.

Os ensaios necessários para a qualificação do procedimento de revestimento por soldagem para chapas de aço carbono segundo a norma API 6A são: Análise química na camada de revestimento, dobramento lateral e dureza no metal de revestimento [12]. A quantidade dos corpos de prova retirados em cada experimento pode ser observada na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Quantidade de corpos de prova necessários para a qualificação de um procedimento de soldagem conforme a norma API 6A [12].

TIPO DE ENSAIO	QUANTIDADE
Análise Química	1
Dobrimento Lateral	1
Dureza Vickers	3 pontos no revestimento

Os critérios de aceitação quando necessários, utilizados nos ensaios realizados são descritos pela API 6A [12].

4.3.3 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA SOLDAGEM

No experimento 1 foi utilizado o processo eletrodo revestido com junta tipo de "overlay". Este corpo de prova utilizou polaridade direta com passes cruzados e sobreposição dos cordões de solda em torno de 50%. As variáveis utilizadas durante a soldagem estão descritas na tabela 4.9.

Foram utilizados como metal de adição os eletrodos conforme AWS A5.9 ER309L e AWS A5.9 316L com diâmetro 3,2mm.

Tabela 4.9 - Variáveis utilizadas para cada camada na soldagem do experimento 1.

Camadas	Sentido de Soldagem	Metal de adição	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Polaridade	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (mm/min.)
1ª	Transversal	AWS 5.9 309L-16	3,2	90 - 120	CC-	20-30	60 a 100
2ª	Longitudinal	AWS 5.9 309L-16	3,2	90 - 120	CC-	20-30	60 a 100
3ª	Transversal	AWS 5.9 316L-16	3,2	90 - 120	CC-	20-30	60 a 100
4ª	Longitudinal	AWS 5.9 316L-16	3,2	90 - 120	CC-	20-30	60 a 100
5ª	Transversal	AWS 5.9 316L-16	3,2	90 - 120	CC-	20-30	60 a 100

No experimento 2 foi utilizado o processo eletrodo revestido com junta tipo de "overlay". Este corpo de prova utilizou polaridade reversa com passes cruzados e sobreposição dos cordões de solda em torno de 50%. As variáveis utilizadas durante a soldagem estão descritas na tabela 4.10.

Foram utilizados como metal de adição os eletrodos conforme AWS A5.9 ER309L e AWS A5.9 316L com diâmetro 3,2mm.

Tabela 4.10 - Variáveis utilizadas para cada camada na soldagem do experimento 2.

Camadas	Sentido de Soldagem	Metal de adição	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Polaridade	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (mm/min.)
1ª	Transversal	AWS 5.9 309L-16	3,2	90 - 120	CC+	18 - 25	60 a 100
2ª	Longitudinal	AWS 5.9 309L-16	3,2	90 - 120	CC+	18 - 25	60 a 100
3ª	Transversal	AWS 5.9 316L-16	3,2	90 - 120	CC+	18 - 25	60 a 100
4ª	Longitudinal	AWS 5.9 316L-16	3,2	90 - 120	CC+	18 - 25	60 a 100
5ª	Transversal	AWS 5.9 316L-16	3,2	90 - 120	CC+	18 - 25	60 a 100

4.3.4 CONTROLE DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM

Durante a soldagem o monitoramento da corrente e da tensão foi executado com a utilização de um amperímetro e voltímetro instalado na fonte de soldagem para ambos os experimentos.

Para obter a velocidade de soldagem foi utilizado o comprimento de cada cordão de solda e dividido pela tempo de execução do mesmo.

4.4 ENSAIOS REALIZADOS

4.4.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA

4.4.1.1 MACROGRAFIA

As macrografias dos experimentos CP1 e CP2 foram realizadas conforme a norma ASME IX [18].

A partir das macrografias foram realizadas o cálculo de diluição, a verificação de descontinuidades e a medição da altura do revestimento.

4.4.1.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.

A realização da análise microestrutural dos diferentes corpos de prova, foi feita em seções cortadas com dimensões de 25 x 50 mm, seguidamente realizou-se uma preparação na face das amostras com lixas de diferentes granulometrias. A sequência de granulometria das lixas foi: 180, 220, 320, 400, 600 e 1000 “meshes” e polidas com pasta de diamante na sequência: 6, 3 e 1 μm de tamanho médio de partícula. Posteriormente foi realizado um polimento automático usando uma suspensão de sílica coloidal com tamanho médio de partícula de 0,06 μm .

Uma vez obtida a superfície totalmente polida o material foi submetido a ataque eletrolítico em solução aquosa contendo 10% $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ácido oxálico) para a camada de aço inoxidável austenítico. O tempo de ataque foi aproximadamente 35s com uma tensão de 5V. O equipamento utilizado para o ataque foi o POLECTROL da Struers®. Por outro lado, o ataque do material base (aço Carbono A36) foi realizado com o reagente químico Nital 2% durante um tempo de 50s.

A aquisição de imagens foi feita utilizando a câmera digital Opticam OPT 10000 acoplada no microscópio de marca Olympus BX60M.

4.4.1.3 QUANTIFICAÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA DELTA

Foram realizadas as medições de fração volumétrica de ferrita delta utilizando o equipamento Ferritoscópio FMP-30® nos experimentos CP1 e CP2.

4.4.2 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química foi realizada via espectrometria nos dois experimentos. As regiões onde foram realizadas essas análises foram a 2,0 mm da face do metal de base em direção ao metal de revestimento e na face do metal de revestimento, sob a última camada de revestimento, localizado a 5,0mm da face do metal de base.

4.4.2.1 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO

O critério de aceitação foi baseado na norma API 6A e segue descrito na tabela 4.11 [12].

Tabela 4.11 - Critério de aceitação para a análise de composição química dos experimentos [12].

ELEMENTO QUÍMICO	VALOR
Níquel min.	8,0
Cromo min.	16,0
Carbono max.	0,08

4.4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO.

O ensaio de corrosão foi realizado conforme a norma ASTM-A 262 [11]. Os dois corpos de prova identificados com CP1 e CP2 foram ensaiados nas mesmas regiões onde foi executada a análise química. A primeira região foi a 2,0 mm da face do metal de base em direção ao metal de revestimento e na face do metal de revestimento, sob a última camada de revestimento, localizada a 5,0mm da face do metal de base.

Os ensaios em ácido oxálico foram realizados segundo os procedimentos da Prática A (Norma ASTM A262). As amostras da junta dissimilar foram preparadas conforme o procedimento de metalografia convencional, sendo as amostras levadas até o polimento final com pasta de diamante de granulometria de 1 μ m e atacadas eletroliticamente em solução aquosa contendo 10% H₂C₂O₄.2H₂O (ácido oxálico), a uma densidade de corrente de 1A/cm, durante aproximadamente 90s, e, então, realizou-se análise microestrutural com microscopia ótica com aumentos de 500x vezes.

4.4.3.1 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO

O critério de aceitação foi baseado na norma ASTM A262 [11] onde a microestrutura não pode estar sujeita a suscetibilidade a corrosão intergranular.

4.4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

4.4.4.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL

Os corpos de prova de dobramento lateral foram realizados conforme a norma ASME IX [18]. Foi ensaiado um corpo de prova para cada experimento.

4.4.4.1.1 Critério de Aceitação

O critério de aceitação foi baseado na norma ASME IX [18]. A área de interesse não devem apresentar defeitos visíveis no metal de revestimento

maiores do que 1,5 mm. Os defeitos medidos não podem totalizar 3,0 mm em qualquer trecho da interface (plano de separação entre o metal base e o metal de revestimento).

4.4.4.2 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza foi baseado na norma API 6A [13] e a localização dos pontos de dureza estão descritas na figura 4.1.

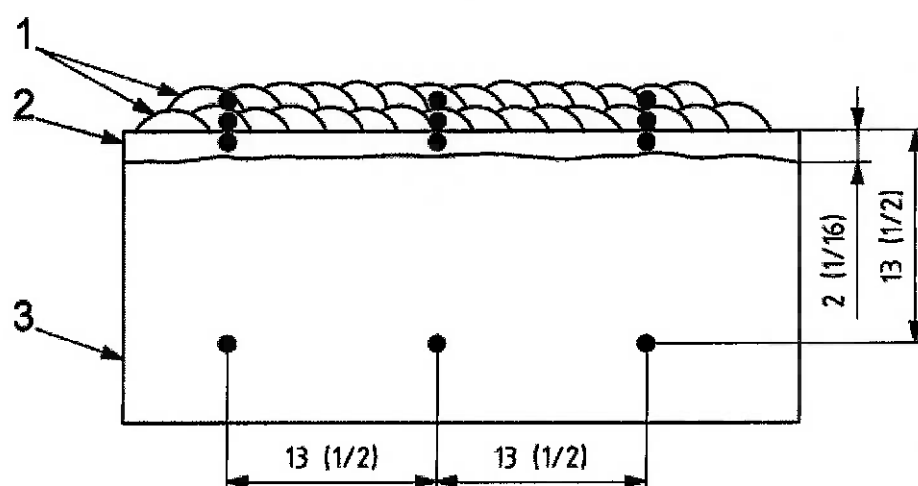


Figura 4.1 - Localização da região onde foram medidas as durezas nos experimentos CP1 e CP2 [12].

4.4.4.2.1 Critério de Aceitação

O critério de aceitação adotado está conforme a norma API 6^a [12] onde exige que os valores para o metal de revestimento não sejam menores ou igual a 83 HRB (160 HV10).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRAFICA

5.1.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MACROGRAFIA

Os resultados referentes a qualidade do cordão de solda de revestimento foram satisfatórios para os corpos de prova CP1 e CP2 conforme critério de aceitação ASME IX [8]. Os valores obtidos estão discriminados na tabela 5.1. Os detalhes das macrografias podem ser observados nas figuras 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de macrografia.

Dimensionamento da Solda			Resultado / Visual:
CP- 1	Diluição (%)	Altura do Revestimento (mm)	
LADO 1	2,98	5,0	Isento de descontinuidades
LADO 2		5,0	Isento de descontinuidades
Dimensionamento da Solda			Resultado / Visual:
CP -2	Diluição (%)	Altura do Revestimento (mm)	
LADO 1	5,14	5,0	Isento de descontinuidades
LADO 2		5,0	Isento de descontinuidades

Analisando os resultados do ensaio de macrografia pode-se observar que não houve alteração dos valores de penetração quando se altera a polaridade do eletrodo revestido. Também nenhum dos experimentos apresentou indicação de descontinuidades.

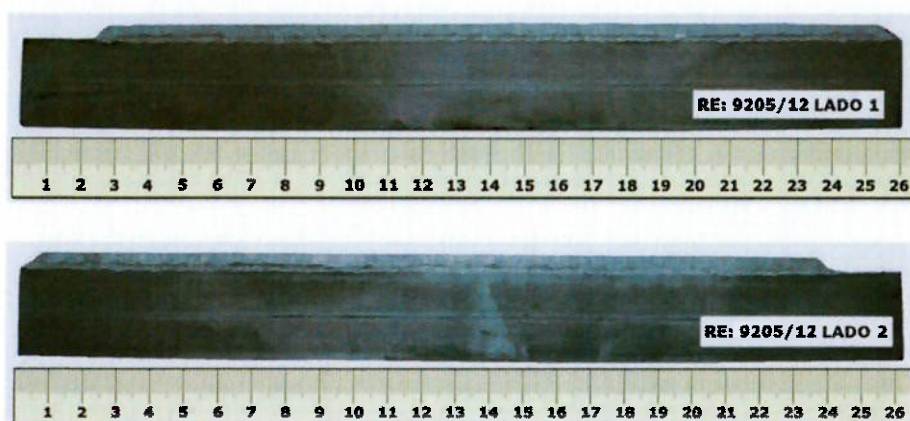


Figura 5.1 - Macrografia do corpo de prova CP1 analisado.

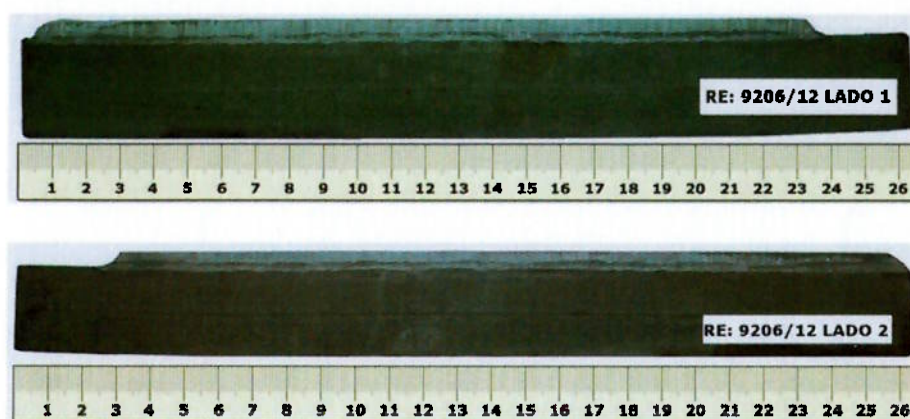


Figura 5.2 - Macrografia do corpo de prova CP2 analisado.

5.1.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

A microestrutura dos metais de base utilizados em ambos os experimentos podem ser observadas nas figuras 5.3 e 5.4. Este material possui microestrutura composta basicamente por ilhas de perlita dispersa em uma matriz ferrítica.

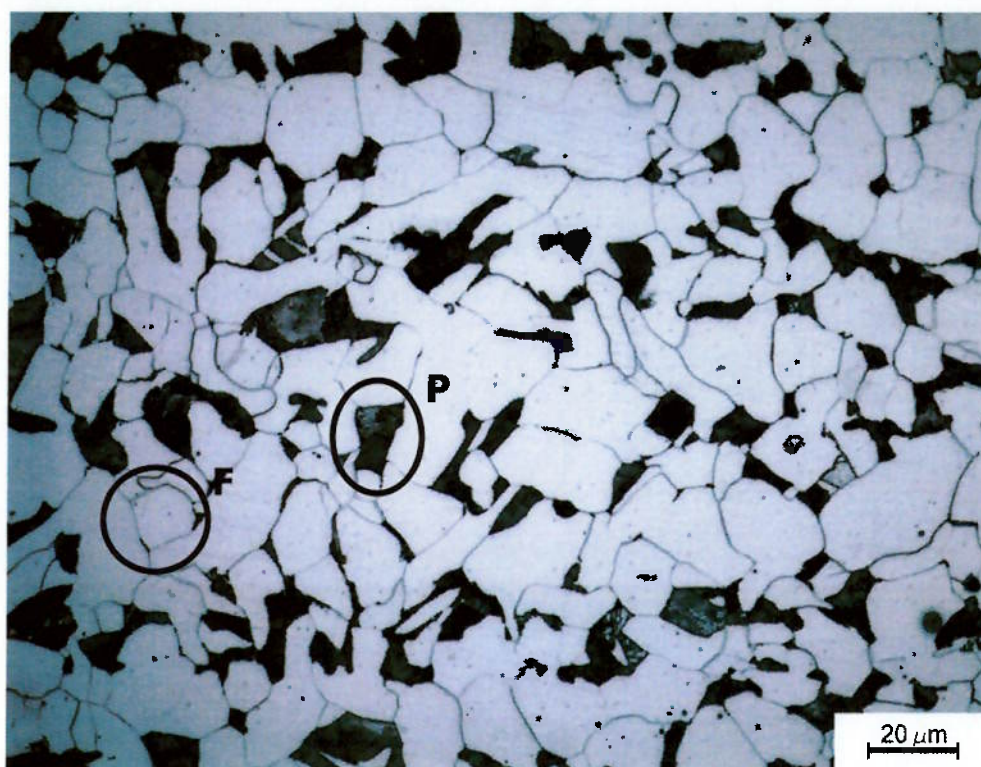


Figura 5.3 - Microestrutura do metal base do CP1 composta por matriz ferrítica (F) e ilhas de perlita (P). Nital 2%. Aumento 500x.

A ZAC foi dividida em três regiões que podem ser observadas nas figuras 5.5 (CP1) e 5.6 (CP2). Essa região está dividida em ZAC próxima do metal de base (a), ZAC central (b) e ZAC próxima do metal de revestimento (c).

As microestruturas das ZAC's próxima do metal de base dos corpos de prova CP1 e CP2 são mostradas nas figuras 5.7 e 5.8. Analisando essas microestruturas é possível constatar que ambos os experimentos degeneraram a perlita e os grãos de ferrita quase não apresentam alterações quando comparadas ao metal de base.

As microestruturas da região central das ZAC's são mostradas nas figuras 5.9 e 5.10 para o CP1 e figuras 5.11 e 5.12 para o CP2. As

microestruturas das ZAC's na região próxima do metal de revestimento são mostradas nas figuras 5.13 e 5.14.

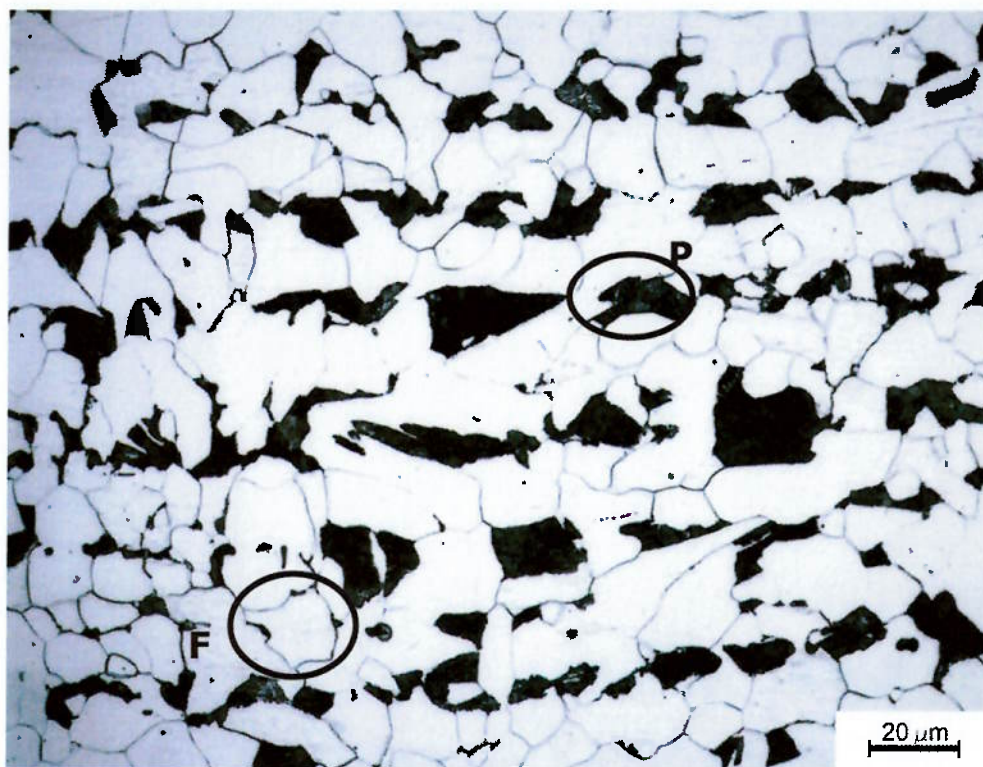


Figura 5.4 - Microestrutura do metal base composta por matriz ferrítica (F) e ilhas de perlita (P). Nital 2%. Aumento 200x.

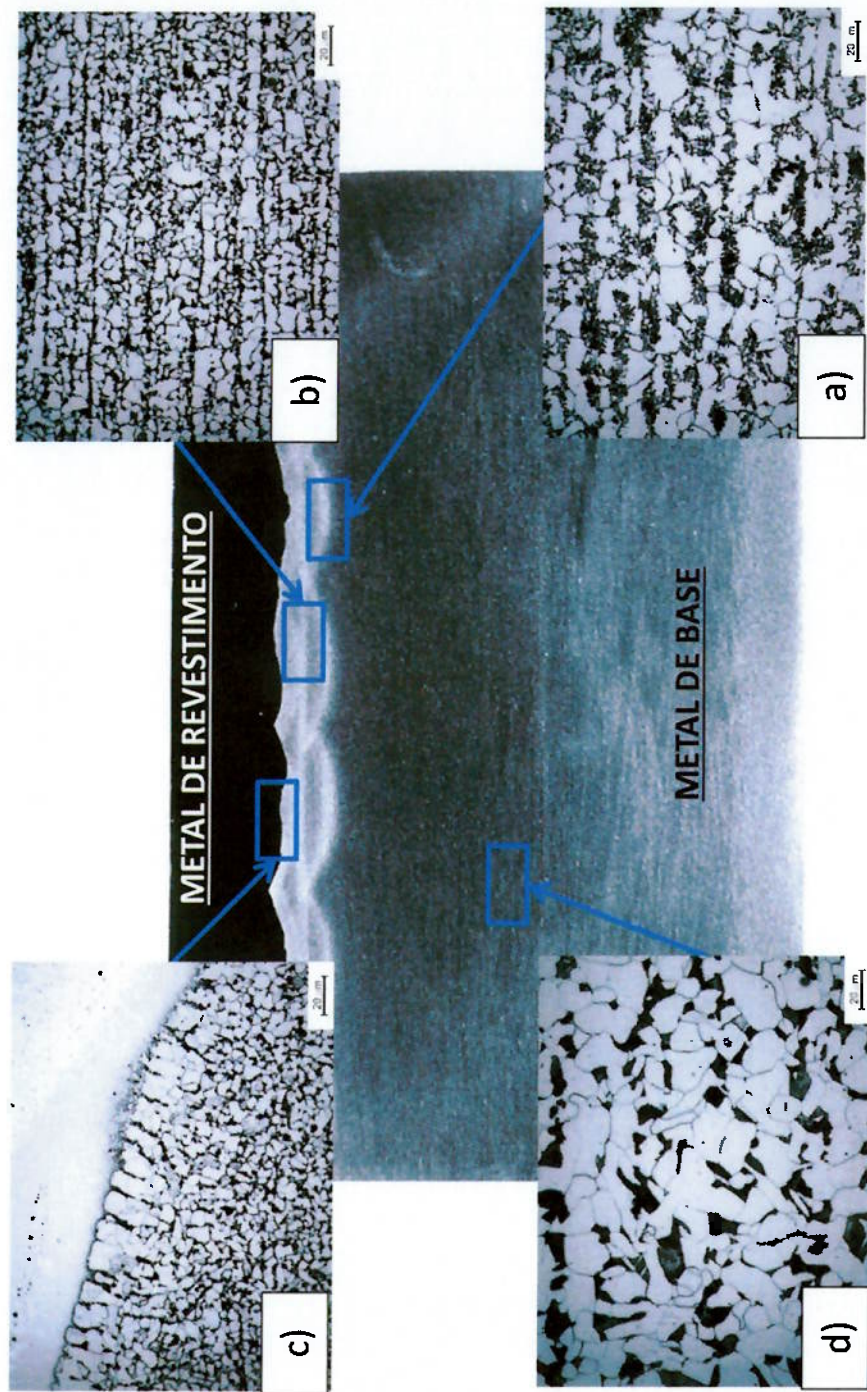


Figura 5.5 - Montagem da macrografia do CP1 mostrando as regiões da ZAC próxima do metal de base (a), a ZAC central (b), a ZAC próxima do metal de revestimento (c) e o metal de base (d).

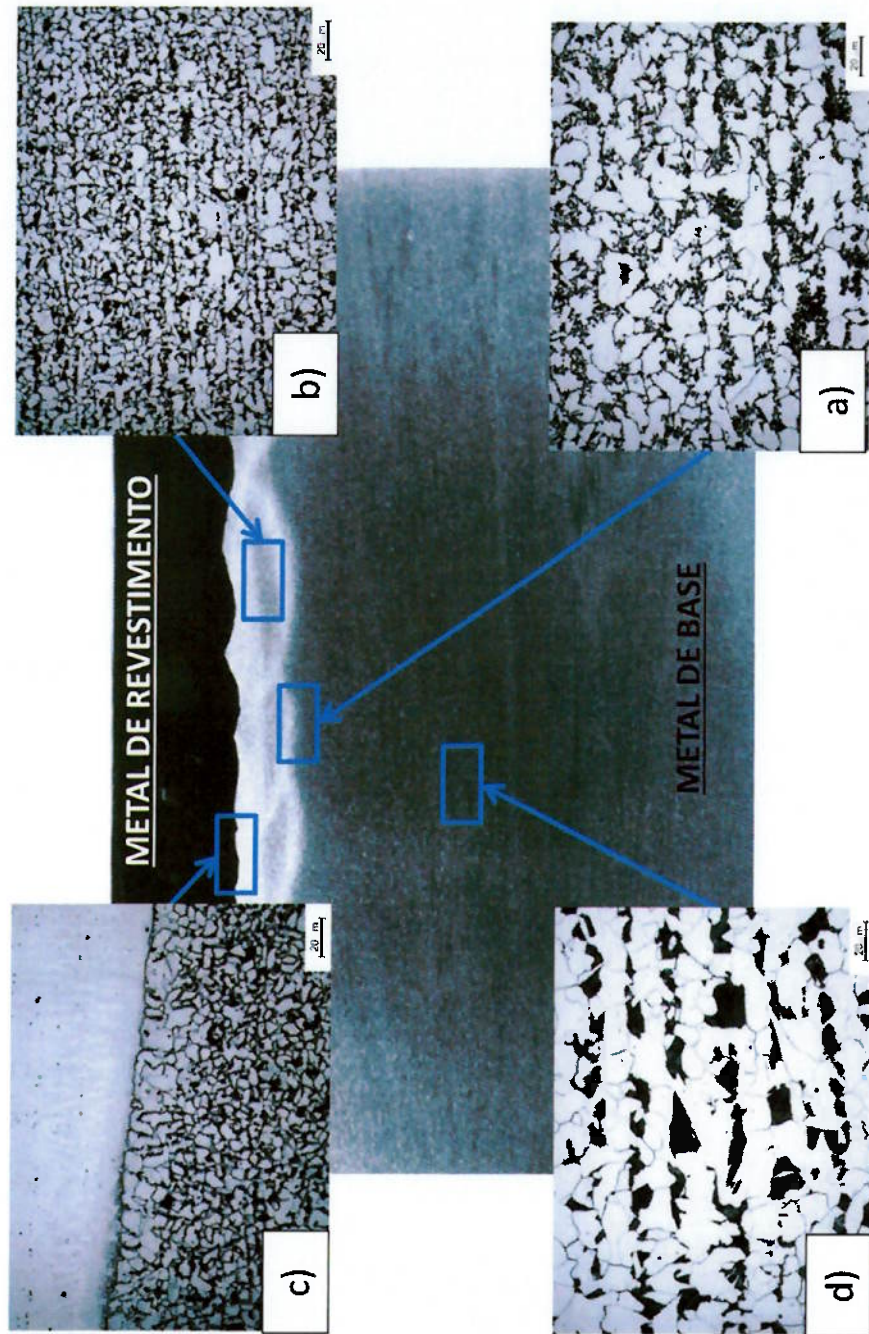


Figura 5.6 - Montagem da macrografia do CP2 mostrando as regiões da ZAC próxima do metal de base (a), a ZAC central (b), a ZAC próxima do metal de revestimento (c) e o metal de base (d).

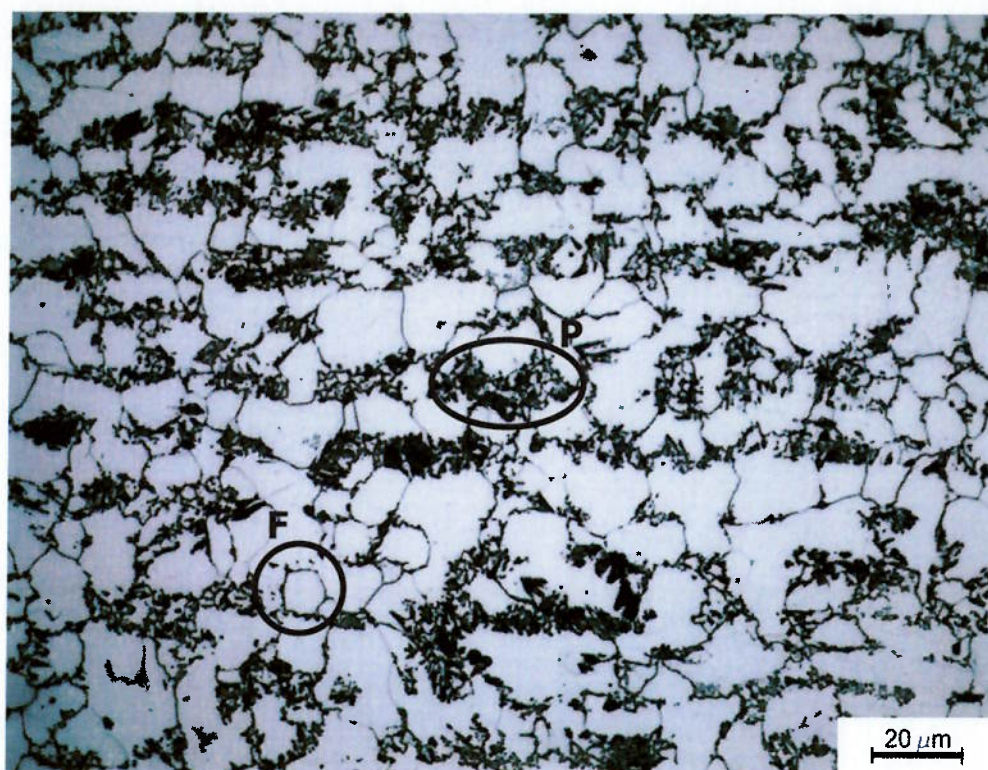


Figura 5.7 - Microestrutura da ZAC próxima do metal de base do CP1 é basicamente composta por matriz ferrítica (F) e ilhas de perlita degeneradas (P). Nital 2%. Aumento 500x.

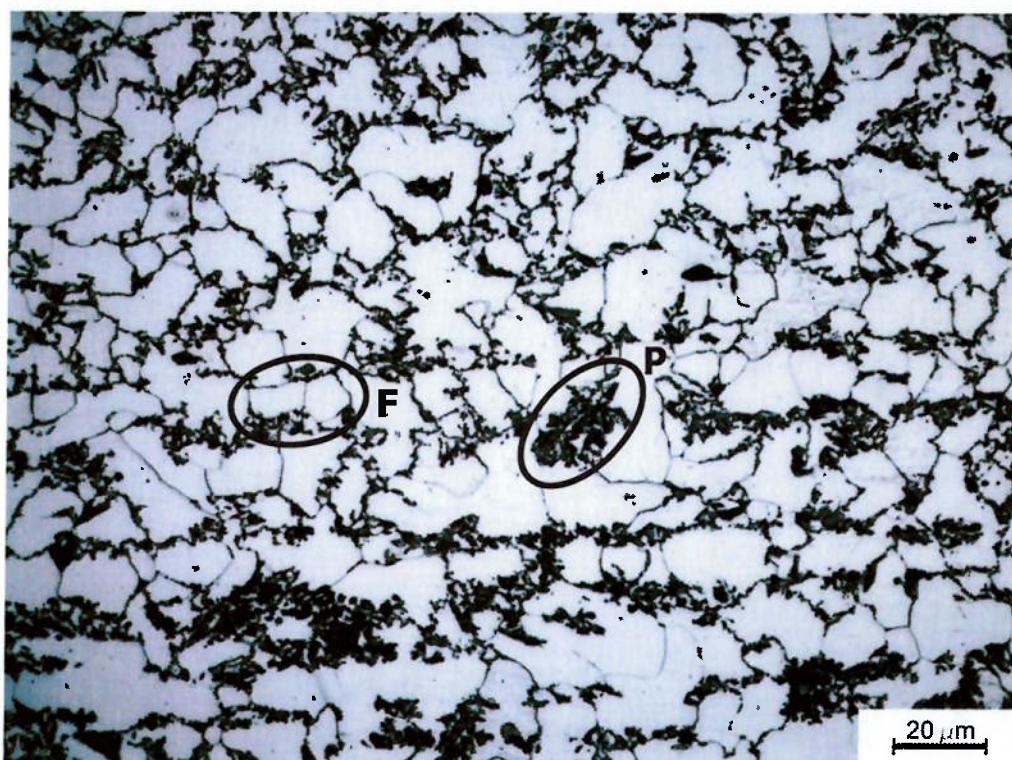


Figura 5.8 - Microestrutura da ZAC próxima do metal de base do CP2 é basicamente composta por matriz ferrítica (F) e ilhas de perlita degeneradas (P). Nital 2%. Aumento 500x.

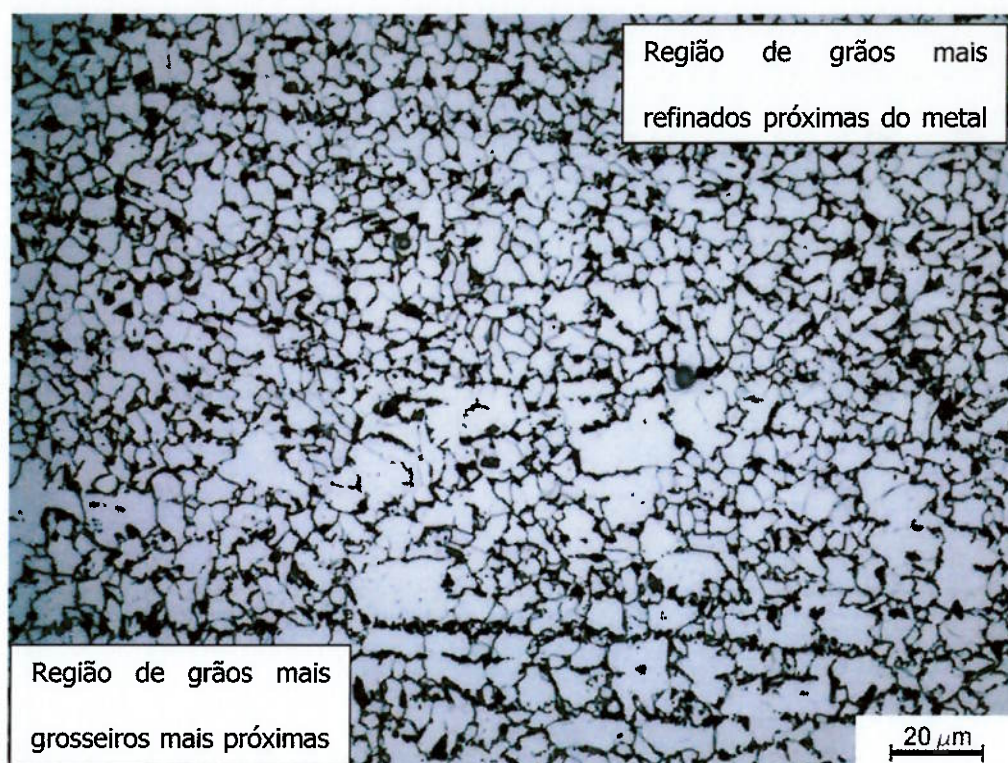


Figura 5.9 - Microestrutura da região central da ZAC do CP1. Nital 2%. Aumento 500x.

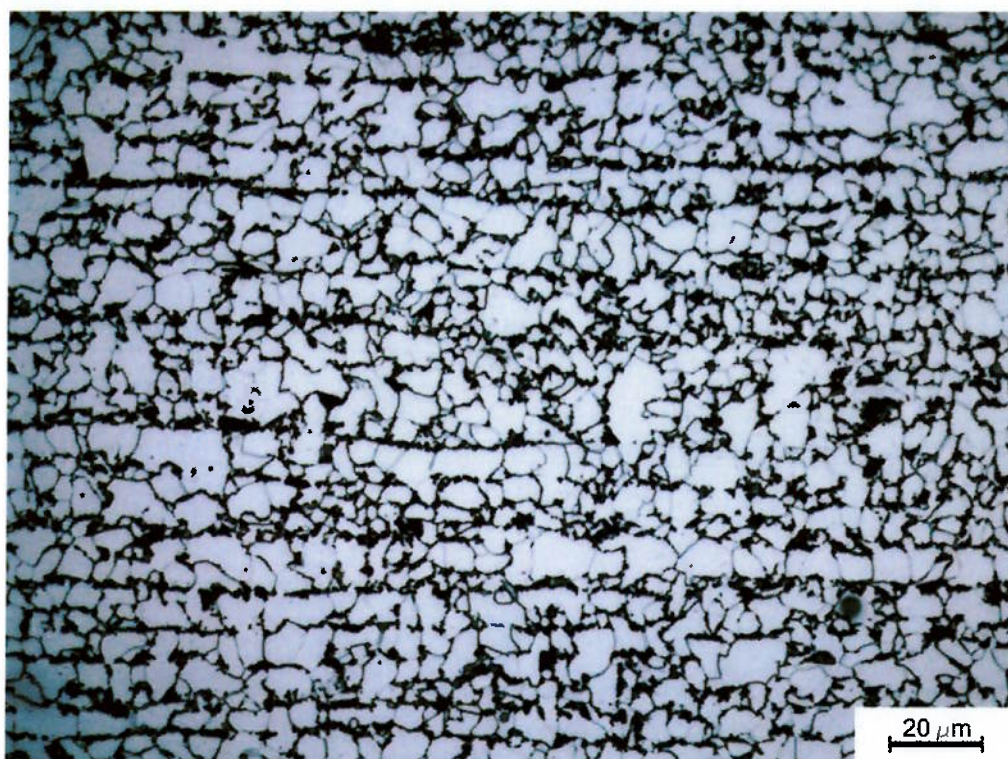


Figura 5.10 - Microestrutura da região central da ZAC do CP1 mais próxima do metal de revestimento. Nital 2%. Aumento 500x.

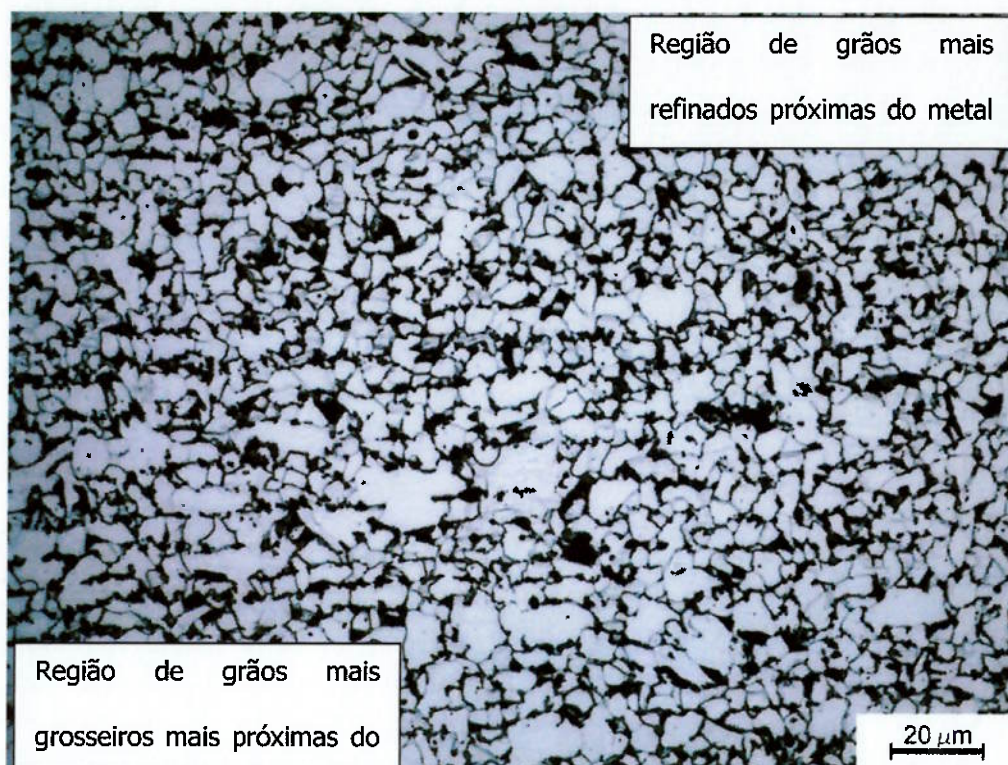


Figura 5.11 - Microestrutura da região central da ZAC do CP2. Nital 2%. Aumento 500x.



Figura 5.12 - Microestrutura da região central da ZAC do CP2 mais próxima do metal de revestimento. Nital 2%. Aumento 500x.

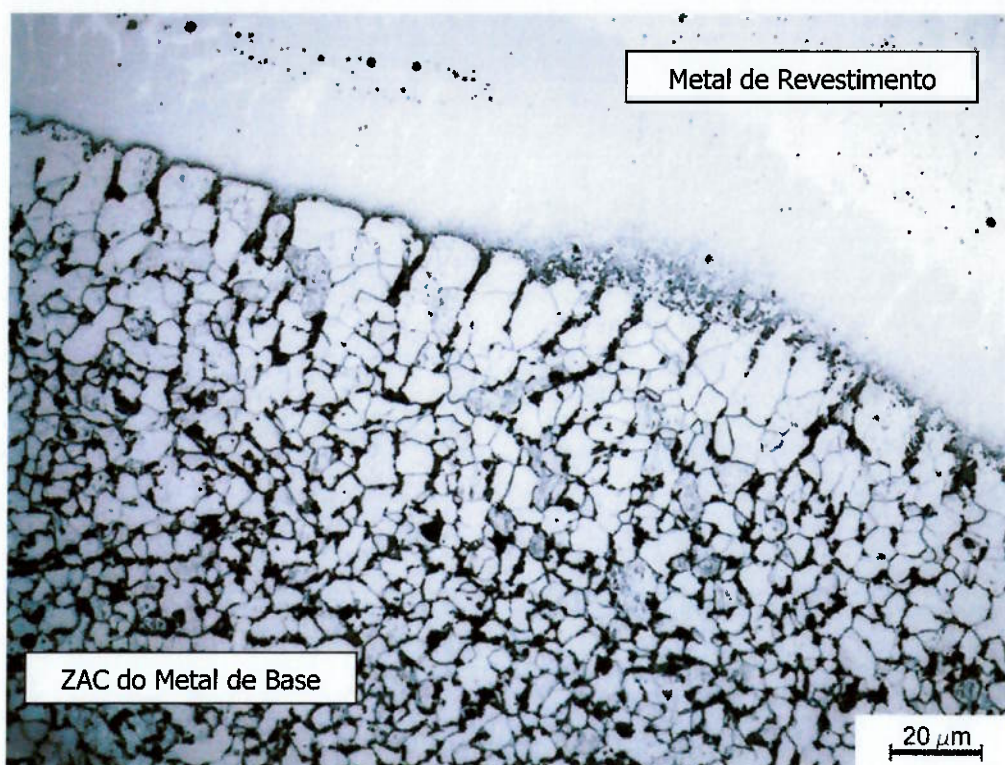


Figura 5.13 - Microestrutura da ZAC próxima do metal de revestimento do CP1. Nital 2%. Aumento 500x.

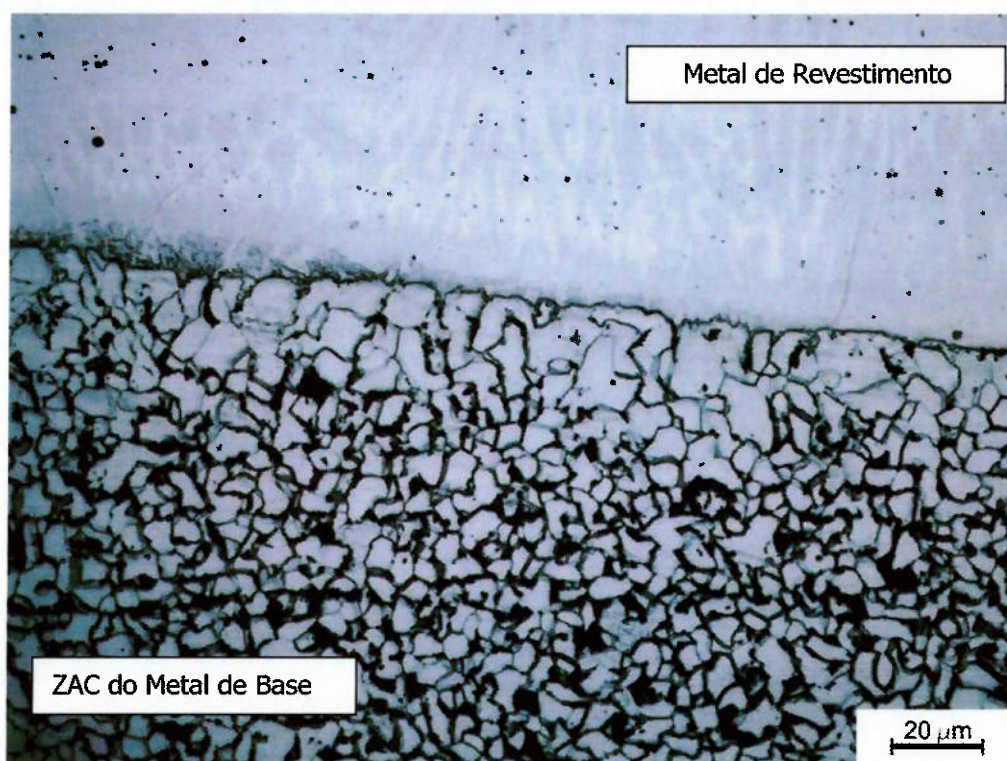


Figura 5.14 - Microestrutura da ZAC próxima do metal de revestimento do CP2. Nital 2%. Aumento 500x.

Analisando as diversas regiões da ZAC podemos observar que não há grandes diferenças entre os experimentos. Mesmo modificando a polaridade dos eletrodo durante a soldagem ambas as ZAC's são composta pelas mesmas regiões.

A microestrutura do metal de revestimento é mostrada na figura 5.15 para o CP1 e na figura 5.16 para o CP2. Na figura 5.15 podemos observar ilhas de Ferrita (F) em uma matriz Austenítica (A) e uma grande quantidade de escória indicada pelas setas na cor vermelha. Na figura 5.16 também podemos observar uma microestrutura muito similar à mostrada na figura 5.15.

Comparando ambos os experimentos, podemos constatar que não há alteração da microestrutura do metal de revestimento em função da polaridade adotada durante a soldagem.



Figura 5.15 - Região da camada do revestimento CP1 com ilhas de ferrita (F) em uma matriz austenítica (A) e uma grande dispersão de pontos de escória indicados por setas na cor vermelha. H₂C₂O₄ 2H₂O 10%. Aumento 500X.



Figura 5.16 - Região da camada do revestimento CP2 com ilhas de ferrita (F) em uma matriz austenítica (A) e uma grande dispersão de pontos de escória indicados por setas na cor vermelha. $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 10%. Aumento 500X.

5.1.3 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA DELTA

Os valores encontrados de teores de ferrita delta estão descritos na tabela 5.2 para ambos os experimentos. Pode-se observar que a fração de ferrita delta não altera com a mudança na polaridade de soldagem.

Tabela 5.2 - Resultados do ensaio de verificação da fração volumétrica da ferrita delta nos corpos de prova CP1 e CP2.

FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FERRITA DELTA (%)		
EXPERIMENTO	REGIÃO	VALOR
CP-1	SUPERFÍCIE	12,7
CP-2	SUPERFÍCIE	12,6

5.2 ANÁLISE QUÍMICA

5.2.1 ANÁLISE QUÍMICA NA REGIÃO DE 2,0 mm DO METAL DE REVESTIMENTO

Os resultados da análise química para a região de 2,0 mm do metal de base estão descritas na tabela 5.3 e para melhor comparação dos devidos valores foi gerado os gráficos dispostos nas figuras 5.18, 5.19 e 5.20. A figura 5.17 ilustra o local da análise química.

Tabela 5.3 - Resultado da análise química dos dois experimentos á 2,0 mm.

Análise Química á 2,0 mm		
Elemento Químico	CP1	CP2
C	0,040	0,050
Si	0,710	0,620
Mn	1,270	1,390
PP	0,02	0,02
S	0,010	0,010
V	0,03	0,02
Nb	0,05	0,05
Ti	0,010	0,010
Ni	12,30	10,60
Cr	23,29	20,30
Mo	0,03	0,03
Co	0,05	0,04
w	0,01	0,01

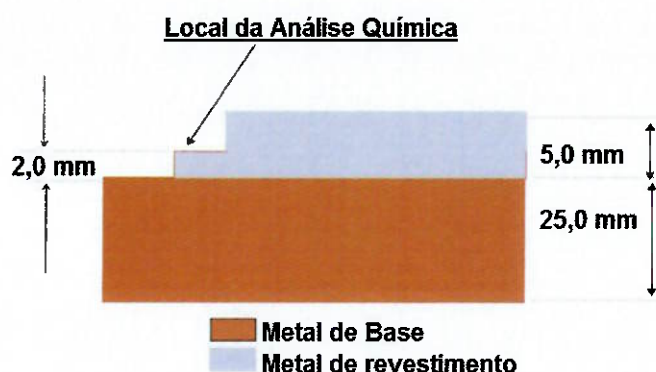


Figura 5.17 - Ilustração do local da análise química.

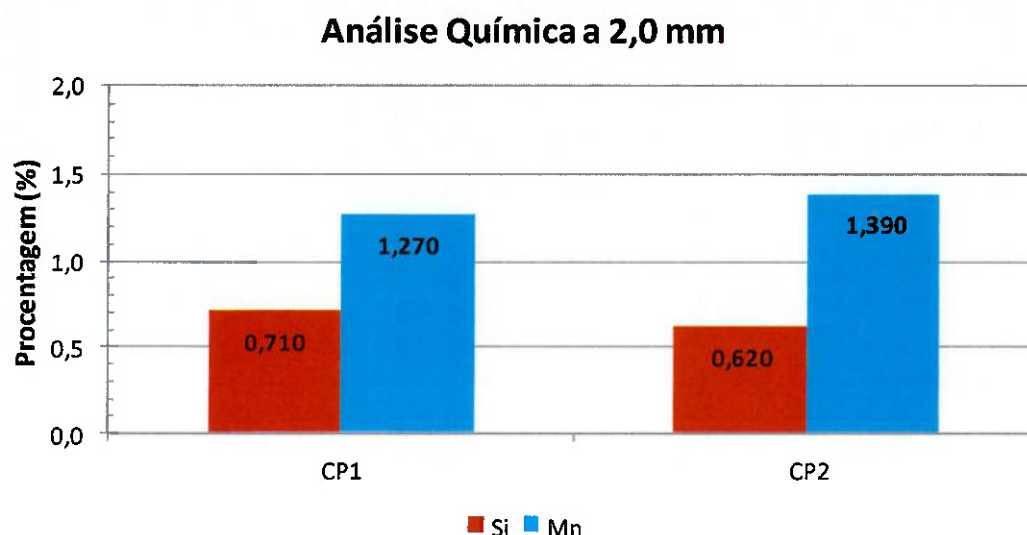


Figura 5.18 - Resultado da análise química a 2,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.

Comparando os resultados da análise química a 2,0 mm da espessura do metal de base dos corpos de prova observa-se que no experimento CP2 (CC+) houve uma redução significativa na porcentagem do Cromo (Cr) e do Níquel (Ni), esta variação possivelmente pode ter sido causada pelas reações químicas e eletroquímicas que estão presentes no arco elétrico [19].

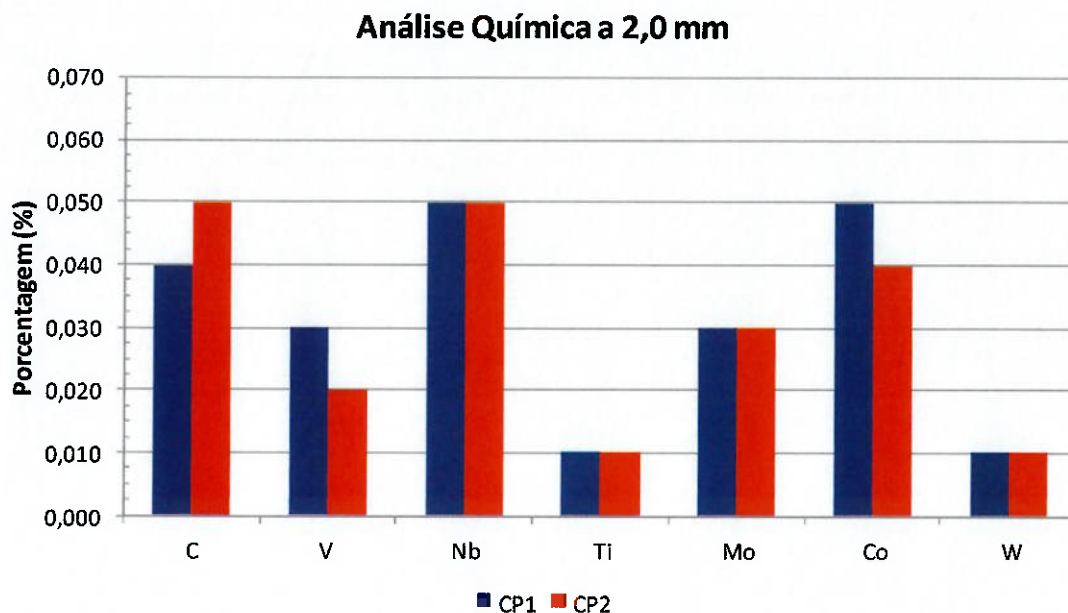


Figura 5.19 - Resultado da análise química a 2,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.

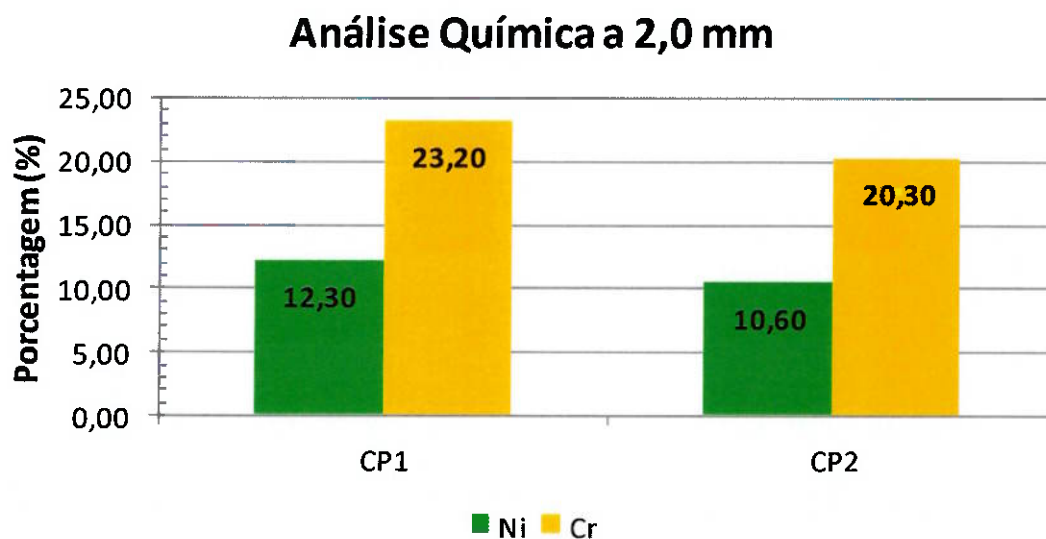


Figura 5.20 - Resultado da análise química a 2,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.

5.2.2 ANÁLISE QUÍMICA NA REGIÃO DE 5,0 mm DO METAL DE REVESTIMENTO

Os resultados da análise química para a região de 5,0 mm do metal de base estão descritas na tabela 5.4 e para melhor comparação dos devidos valores foi gerado os gráficos dispostos nas figuras 5.22, 5.23 e 5.24. A figura 5.21 ilustra o local da análise química.

Tabela 5.4 - Resultado da análise química dos dois experimentos á 5,0 mm.

Análise Química á 5,0 mm		
Elemento Químico	CP1	CP2
C	0,030	0,023
Si	0,903	0,831
Mn	1,586	1,470
P	0,02	0,02
S	0,006	0,007
V	0,05	0,05
Nb	0,030	0,027
Ti	0,020	0,013
Cu	0,06	0,061
Ni	14,58	11,52
Cr	19,56	19,32
Mo	1,87	1,90
Al	0,000	0,000
Co	0,05	0,05
W	0,01	0,01
N	0,064	0,066



Figura 5.21 - Ilustração do local da análise química.

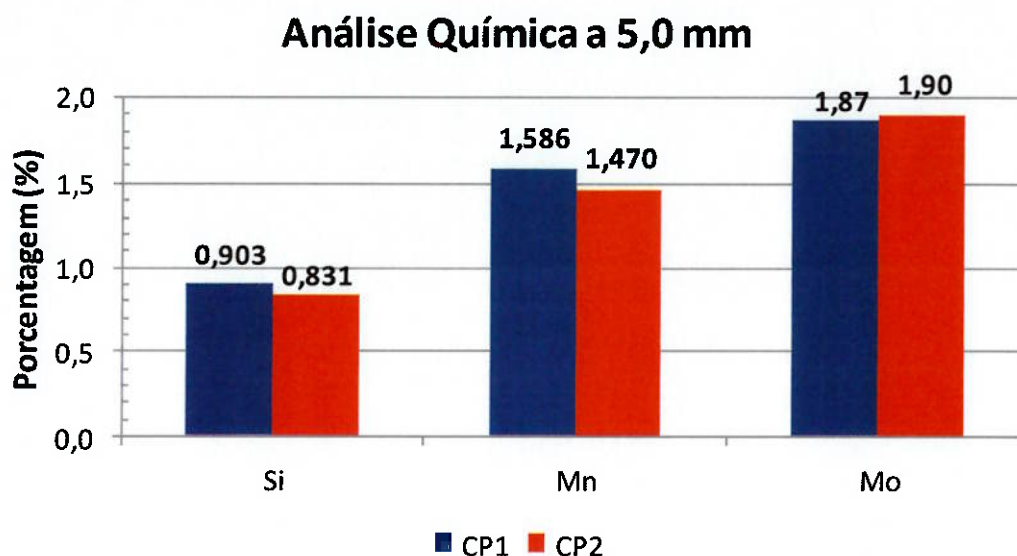


Figura 5.22 - Resultado da análise química a 5,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.

Comparando os resultados da análise química a 5,0 mm da espessura do metal de base observa-se que no experimento CP2 (CC+) houve uma redução significativa na porcentagem do níquel (Ni), este possivelmente pode ter sido causada pelas reações químicas e eletroquímicas que estão presentes no arco elétrico[19]

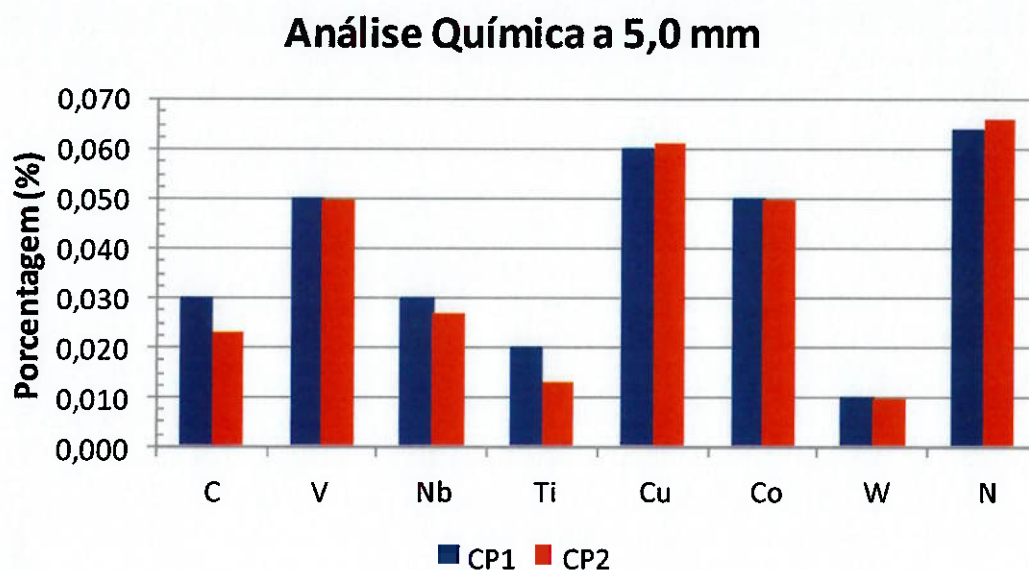


Figura 5.23 - Resultado da análise química a 5,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.

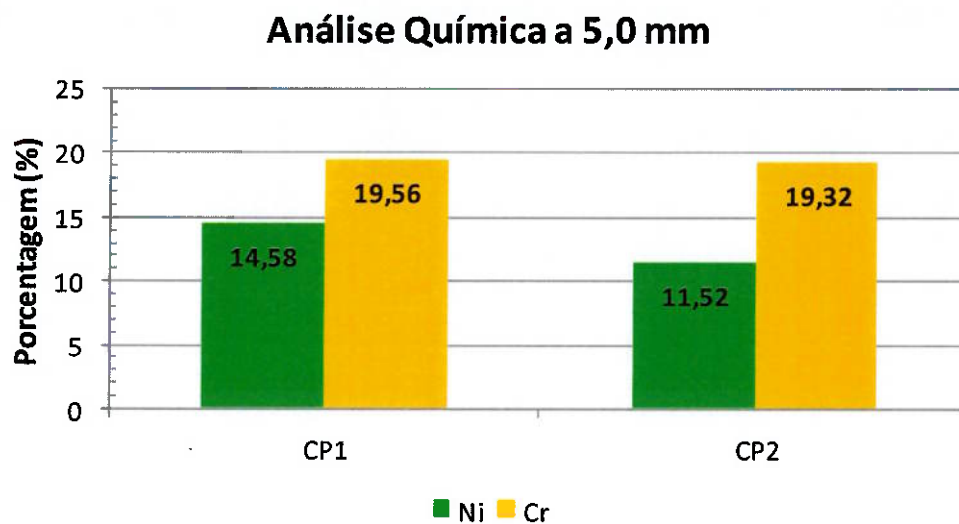


Figura 5.24 - Resultado da análise química a 5,0 mm da espessura do metal de base no metal de revestimento de ambos os experimentos.

5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO (PRÁTICA A)

5.3.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO (PRÁTICA "A") NA REGIÃO DE 2,0 mm DO METAL DE REVESTIMENTO

As figuras 5.25 e 5.26 mostram os resultados do ensaio de resistência à corrosão na região de 2,0 mm do metal de base das amostras CP1 e CP2.

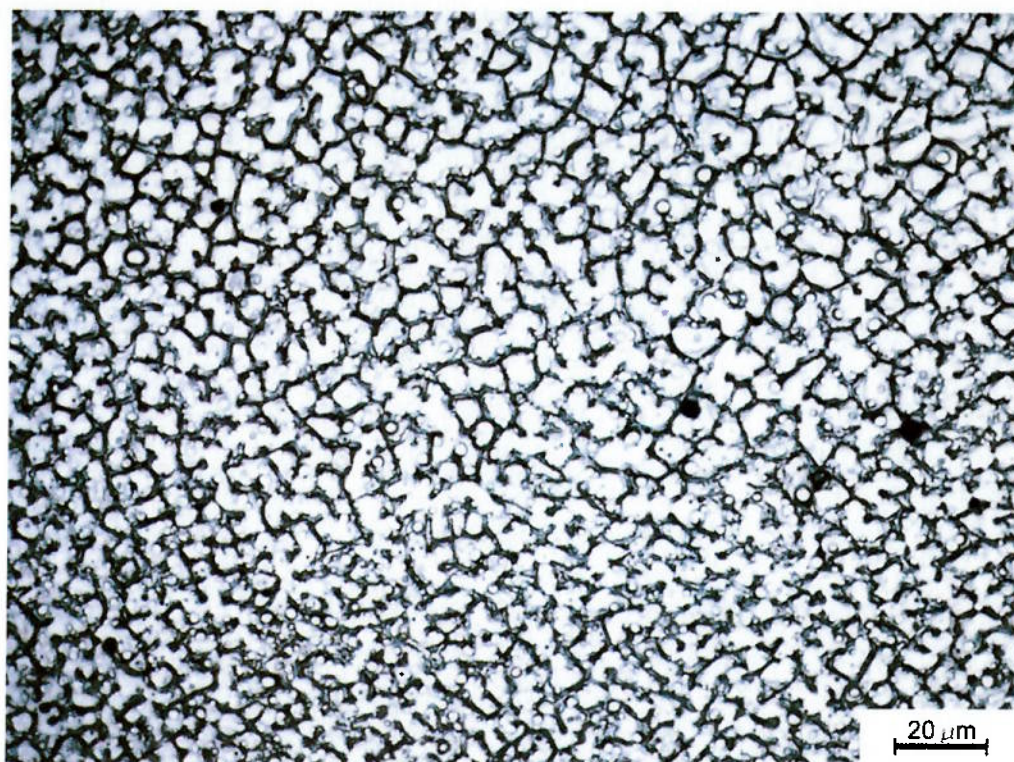


Figura 5.25 - Microestrutura do CP1 da região de 2,0 mm após a realização do ensaio de resistência à corrosão Prática A.

Os resultados apresentados no ensaio de resistência à corrosão são satisfatórios para ambos os experimentos mesmo sendo constatada uma redução dos elementos químicos Cr e Ni e um aumento no teor de C nessa região.

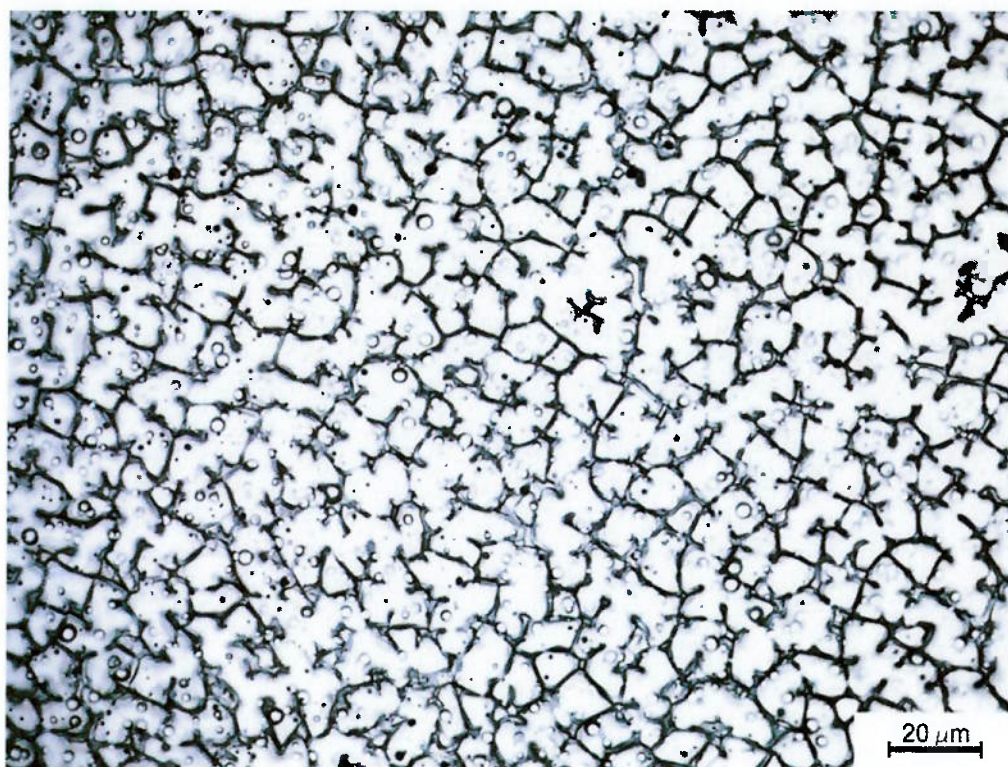


Figura 5.26 - Microestrutura do CP2 da região de 2,0 mm após a realização do ensaio de resistência à corrosão Prática A.

5.3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO (PRÁTICA "A") NA REGIÃO DE 5,0 mm DO METAL DE REVESTIMENTO

As figuras 5.27 e 5.28 mostram os resultados do ensaio de resistência à corrosão na região de 5,0 mm do metal de base das amostras CP1 e CP2.

O CP1 não apresentou sensitização na região de 5,0 mm. O CP2 apresentou microestrutura sensitizada na região de 5,0 mm e este pode estar relacionado a redução do teor de níquel constatada pela análise química.

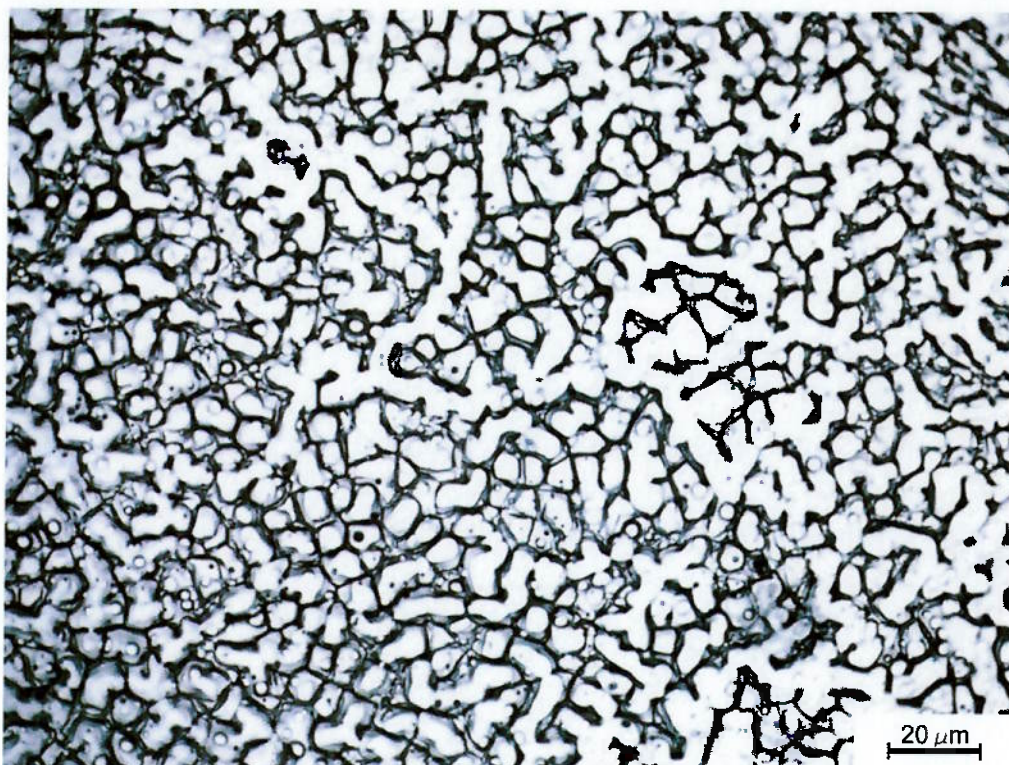


Figura 5.27 - Microestrutura do CP1 da região de 5,0 mm após a realização do ensaio de resistência à corrosão Prática A.



Figura 5.28 - Microestrutura do CP2 da região de 5,0 mm após a realização do ensaio de resistência à corrosão Prática A.

5.4 ENSAIOS MECÂNICOS

5.4.1 DOBRAMENTO LATERAL

O resultado do ensaio de dobramento lateral do CP1 e CP2 foi satisfatório conforme critério de aceitação das normas ASME IX e API 6A. Os detalhes dos corpos de prova são apresentados na figura 5.29 para o CP1 e figura 5.30 para o CP2.

O corpo de prova soldado com polaridade direta (CP1) não apresenta nenhuma aberta na região da junta soldada. O corpo de prova soldado com polaridade reversa (CP2) apresenta pequenas aberturas na linha de ligação entre o metal de base e o metal de revestimento.

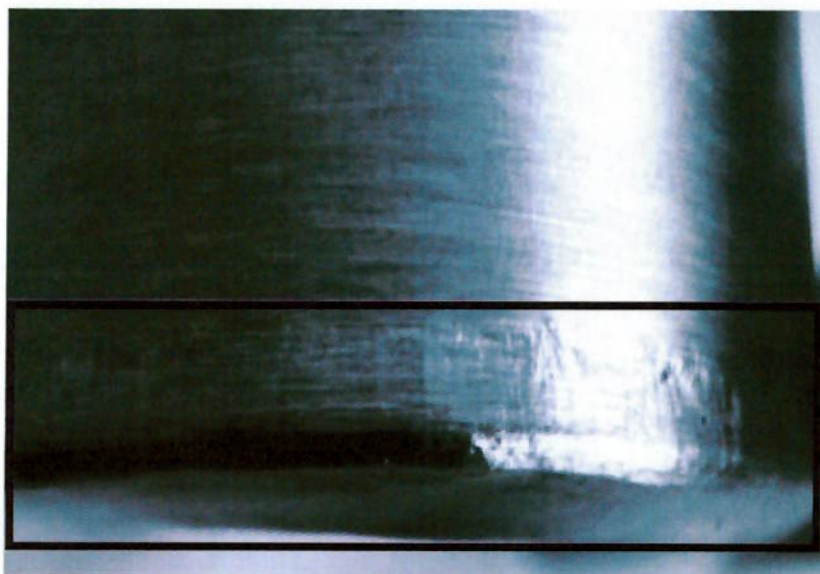


Figura 5.29 - Corpo de prova após o ensaio de dobramento lateral do CP1. Região de interesse marcada com um retângulo isenta de descontinuidade.

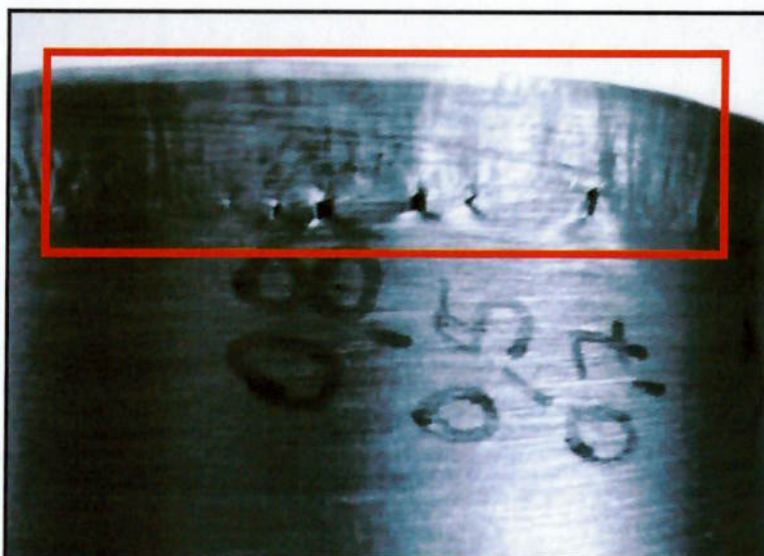


Figura 5.30 - Corpo de prova após o ensaio de dobramento lateral do CP2. Região de interesse marcada com um retângulo apresentando descontinuidades aceitas conforme o critério de aceitação norma ASME seção IX.

5.4.2 ENSAIO DE DUREZA

O resultado referente ao CP1 foi satisfatório conforme critério de aceitação adotado. Os detalhes dos resultados estão listados na tabela 5.5 e figura 5.31. O resultado referente ao CP2 foi satisfatório conforme critério de aceitação adotado. Os detalhes dos resultados estão listados na tabela 5.6 e figura 5.32. Na tabela 5.7 é apresentada uma comparação entre as médias dos experimentos. Para melhor visualização das diferenças entre os experimentos foi desenvolvido o gráfico mostrado na figura 5.33.

Tabela 5.5 - Resultados do ensaio de dureza do corpo de prova CP1.

Região da Junta Soldada	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio Padrão
Revestimento Final	227	227	228	227,3	0,58
Camada de Transição	237	226	226	229,7	6,35
ZAC	168	166	163	165,7	2,52
Metal de Base	153	157	152	154,0	2,65

Medidas de Dureza do Experimento 1

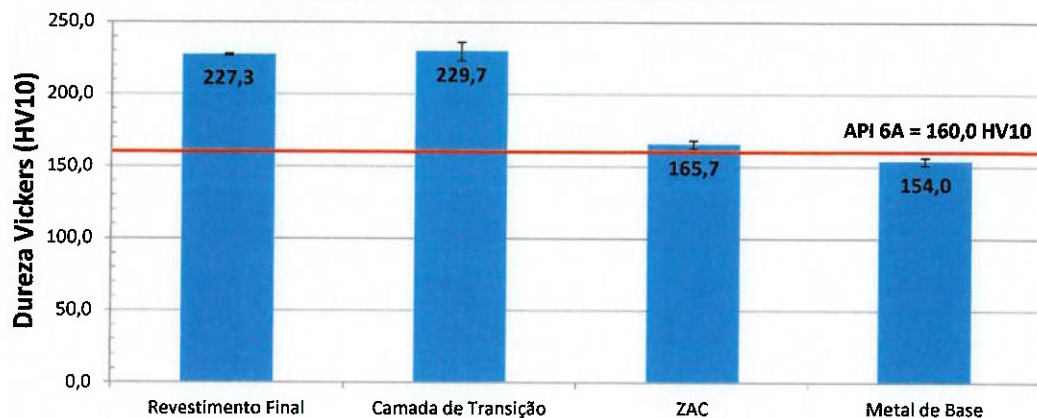


Figura 5.31 - Gráfico demonstrativo dos valores do ensaio de dureza referente ao (CP1).

Tabela 5.6 - Resultados do ensaio de dureza do corpo de prova CP2.

Região da Junta Soldada	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio Padrão
Revestimento Final	222	214	210	215,3	6,11
Camada de Transição	222	223	225	223,3	1,53
ZAC	157	158	165	160,0	4,36
Metal de Base	155	155	156	155,3	0,58

Medidas de Dureza do Experimento 2

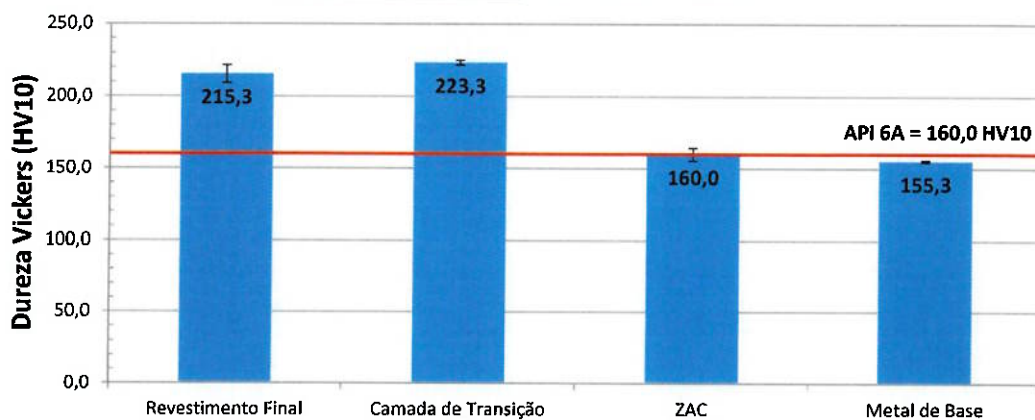
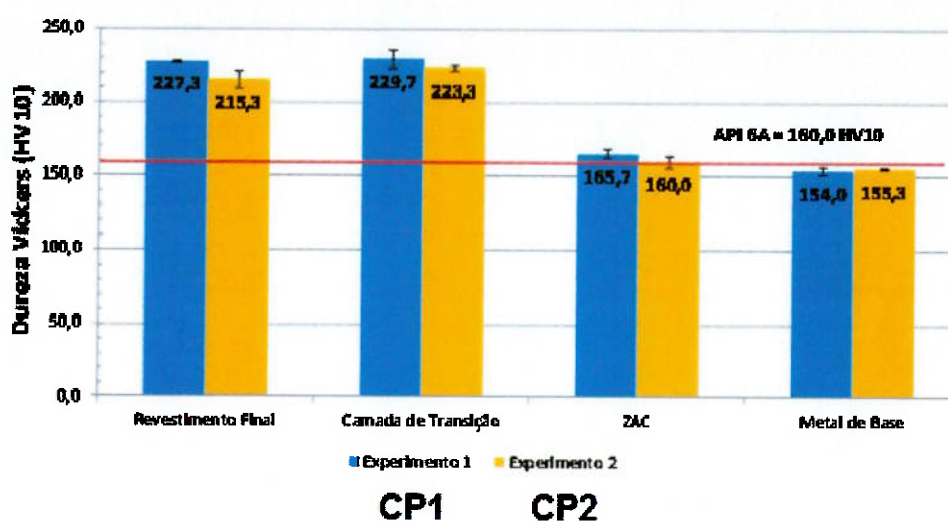


Figura 5.32 - Gráfico demonstrativo dos valores do ensaio de dureza referente ao (CP2).

Tabela 5.7 - Comparação das médias das durezas entre os experimentos.

Região da Junta Soldada	Experimento 1	Desvio Padrão	Experimento 2	Desvio Padrão
Revestimento Final	227,3	0,58	215,3	6,11
Camada de Transição	229,7	6,35	223,3	1,53
ZAC	165,7	2,52	160,0	4,36
Metal de Base	154,0	2,65	155,3	0,58

Medidas de Dureza dos experimentos 1 e 2

**Figura 5.33** - Gráfico de comparação entre os experimentos realizados.

Comparando as médias das durezas entre os experimentos pode-se observar que nas regiões da ZAC e da camada de transição provavelmente não há grandes alterações da dureza em função do tipo de polaridade utilizada na soldagem.

Analisando a região do revestimento final pode-se observar uma provável alteração da dureza em função do tipo de polaridade utilizada na soldagem. Sendo o experimento 1 com os maiores valores e o experimento 2 com os menores valores.

6. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados encontrados neste trabalho pode-se concluir que:

- 1- Os dois procedimentos de soldagem utilizados apresentaram resultados satisfatórios as especificações da norma API 6A sendo qualificados plenamente.
- 2- A polaridade tem influência na composição química, nos elementos C, Ni e Cr, nos metais de solda de revestimento.
- 3- As maiores variações na redução dos elementos químicos C Cr e Ni estão na região de 2,0 mm quando comparado à região de 5,0 mm do metal de revestimento, dessas apenas a região de 5,0 mm do CP2 apresentou uma microestrutura sensitizada no ensaio da prática A.
- 4- A microestrutura não é influenciada pela inversão da polaridade na soldagem de revestimentos.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Estudo da influência da polaridade na soldagem de revestimento através do processo TIG com consumíveis similares.
2. Estudo da influência da polaridade, na soldagem de revestimento resistente a corrosão através do processo Arco Submerso com consumíveis similares.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- 1 OATES, W. R.; SAITTA, A. M. Materials And Aplications - Parte 2. Welding handbook eight edition volume 4, p. 233- 388.
- 2 FOLKHARD, E.; Welding Metalurgy of stainles steel Springer - Verlag, Technology & Engineering - p. 83, 94, 100, 153, 229 - 240-1988 .
- 3 BAKER, H., Alloy Phase Diagrams, Asm metals handbook vol. 3, p. 9 – 59 - 1990.
- 4 AÇOS Inoxidáveis. Problemas de Corrosão, Lamats. Disponível em:< www.pgmeec.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_067.pdf,> Acessado/Nov. /2012.
- 5 GOMES J.H.F. Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular, aço inoxidável austenítico, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá – MG. 2010.
- 6 AÇOS Inoxidáveis Austeníticos: Temperaturas de Tratamentos Térmicos. Disponível em :<http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=79&cod_conteudo=108#> Acessado em: Nov./ 2012.
- 7 RESENDE, A. A. de; Processo de Soldagem Plasma MIG, 2007. (17º Simpósio do Programa de Pós - graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia - MG, 2007.

- 8 SANTOS, D.; BRAGA, E.; MOTA, C.; FERNANDES, A., Características geométricas de soldas de revestimento utilizando pulsação térmica. UFPA, Universidade Federal do Pará, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.
- 9 SPECIFICATION for bare stainless steel welding electrodes and rods SFA-5.9, ASME II parte C /2007.
- 10 SOLDAGEM N 133 – Rer. K Petróleo Brasileiro S.A. Rio de Janeiro agosto / 2012.
- 11 STANDARD Practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels¹. ASTM- A 262/08.
- 12 SPECIFICATION for wellhead and christmas tree equipment ANSI/API specification 6A twentieth edition, october 2010.
- 13 STANDARD Test Methods and Definitions For Mechanical Testing of Steel Products: A370, American Society For Testing and Materials. 2008.
- 14 PENETRANT Testing is available ASTM- E165 Edition, 2012.
- 15 CARBON Structural Standard for Specification steel. ASTM A 36 /2008.
- 16 KOU, S. Welding Metallurgy. Second Edition - 2002 – 431 a 459 p.
- 17 BRACARENSE, A. Q.; Processo de Soldagem GMAW pulsado. (Universidade Federal de Minas Gerais), grupo de Robótica, soldagem e simulação, 2005.
- 18 QUALIFICATION standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators, ASME Section IX, july 1 2010.
- 19 FEDELE, R.; BRANDI, S. D.; DAMASCENO, J. M., Influência dos parâmetros de soldagem por eletrodo revestido na transferência de elementos

SLD-Monografia 14/2013 – T3

químicos, trabalho apresentado no XXVI Congresso Nacional de Soldagem. Curitiba/2000.

20 NONDESTRUCTIVE Examination ASME Section V / 2010.

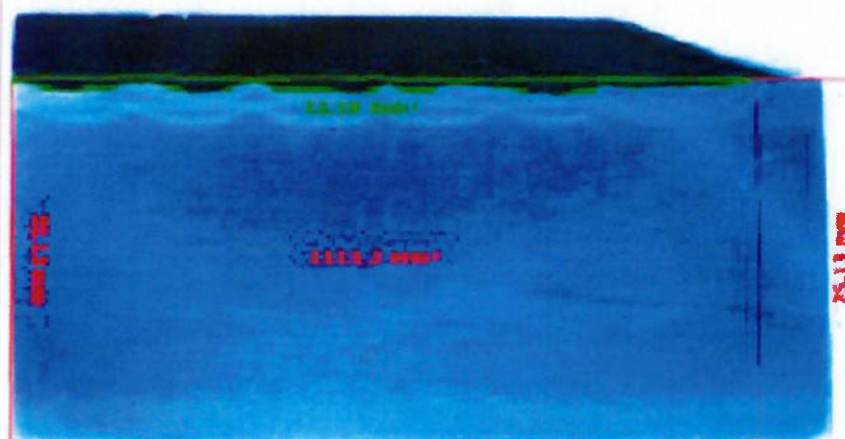
21 RULES for Construction of Pressure Vessels ASME VIII Div. 1 / 2010.

22 *STANDARD Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*
ASTM E92 / 2008.

23 STANDARD Practice for Liquid Penetrant Examination for General
Industry ASTM E165 / E165M - 12

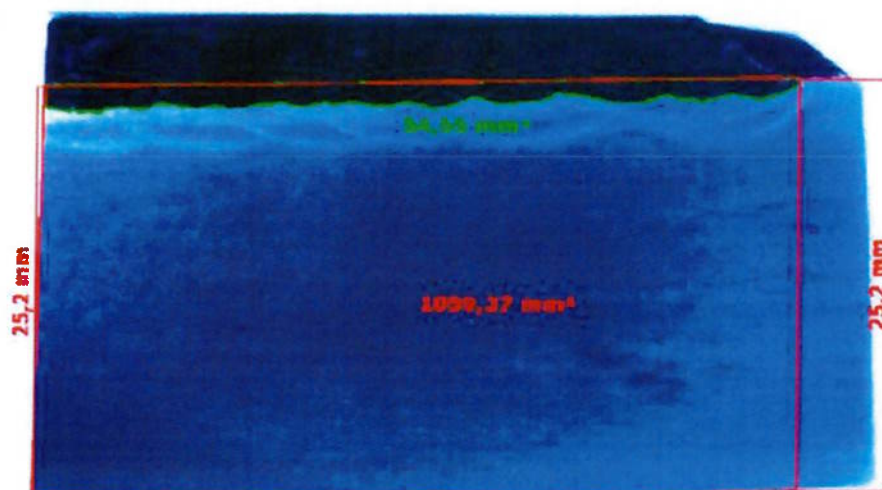
ANEXO I – Cálculo da diluição

CP1-Polaridade Direta



$$\% \text{ Diluição} = \frac{\text{Área diluída}}{\text{Área do metal fundido}} \times 100 > \frac{22,19}{1113,2} = 2,98$$

CP2 Polaridade reversa



$$\% \text{ Diluição} = \frac{\text{Área diluída}}{\text{Área fundida}} \times 100 > \frac{54,55}{1059,37} = 5,14$$