

CENTRO UNIVERSITÁRIO ESTADUAL DA ZONA OESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MATERIAIS

Caracterização Microestrutural do Revestimento Dissimilar de Aço
Inoxidável Austenítico AISI 316L, sobre a Face de uma Solda do
Aço Carbono ASTM A516 Grau 70

Hélio Pires Junior

Rio de Janeiro
2016

CENTRO UNIVERSITÁRIO ESTADUAL DA ZONA OESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MATERIAIS

**Caracterização Microestrutural do Revestimento Dissimilar de Aço
Inoxidável Austenítico AISI 316L, sobre a Face de uma Solda do
Aço Carbono ASTM A516 Grau 70**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Centro Universitário Estadual da Zona Oeste. Área de concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais Metálicos.

Orientado: Hélio Pires Junior
Orientadores: Prof. D.Sc. Carlos Alberto Martins Ferreira e Prof. D.Sc. Alisson Clay Rios da Silva.

Rio de Janeiro
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

X000 Junior, Hélio Pires.

Caracterização Microestrutural do Revestimento
Dissimilar de Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L, sobre a
Face de uma Solda do Aço Carbono ASTM A516 Grau 70/
Hélio Pires Junior. – 2016.
133f.

Orientadores: Prof. D.Sc. Carlos Alberto Martins Ferreira
e Prof. D.Sc. Alisson Clay Rios da Silva..
Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário Estadual
da Zona Oeste, Rio de Janeiro.

1. Soldagem de revestimento 2. Aço inoxidáveis
Austeníticos 3. Processo de soldagem Eletroescória.
Centro Universitário Estadual da Zona Oeste.

Data

Hélio Pires Junior

Hélio Pires Junior

Caracterização Microestrutural do Revestimento Dissimilar de Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L, sobre a Face de uma Solda do Aço Carbono ASTM A516 Grau 70.

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Centro Universitário Estadual da Zona Oeste. Área de concentração:

Aprovado em: 29 de setembro de 2016.

Banca Examinadora:

Profº D.Sc. Carlos Alberto Martins Ferreira (Orientador)
Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO

Profº D.Sc. Alisson Clay Rios da Silva
Universidade Federal do Pará – UFPA.

Profº D.Sc. Mauro Carlos Lopes de Souza
Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO

Profº D.Sc. Rodrigo Felix de Araujo Cardoso
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Rio de Janeiro

2016

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a todos que de alguma forma contribuíram para que ele fosse concluído, em especial à minha esposa Edilayne e à minha filha Maria Clara, que sempre me apoiam em meus projetos, e tiveram paciência nos dias em que não estive presente.

Agradeço a Deus por ter me ajudado a concretizar mais um sonho, por ter estado ao meu lado em todos os momentos da minha vida, pelo seu amor infinito, por renovar a cada momento a minha força e disposição. Sem Ele nada sou.

A todos os professores da UEZO, em especial a meus orientadores Dr. Alysson Clay Rios da Silva e Dr. Carlos Alberto Martins Ferreira, que sempre estiveram dispostos a ajudar e pela dedicada orientação.

A toda a diretoria e funcionários da empresa EBSE, em especial ao Engenheiro Roberto Fernandes, por ceder laboratórios e todas as informações e materiais para realização dos ensaios.

A todos os amigos e familiares que compartilharam da minha caminhada e àqueles que mesmo distantes torceram por mim.

A todos os meus colegas de classe pela ótima convivência.

Obrigado a todos que tanto contribuíram para a conclusão desta etapa.

RESUMO

O objetivo do trabalho é caracterizar metalurgicamente a microestrutura resultante após soldagem dissimilar para revestimento de chapas de aço carbono com aço inoxidável. A pesquisa se iniciou por um levantamento bibliográfico com foco na importância e necessidade da utilização de revestimentos e metais de base de materiais distintos e nas principais características resultantes da união destes materiais. Como material para análise foram utilizadas duas amostras de chapa de aço carbono de 25 mm de espessura, unidas por solda de topo pelo processo a Arco Submerso (SAW). Pelo processo por eletroescória (ESW), foi depositado revestimento em aço inox somente sobre o cordão de solda de aço carbono. Como ensaios foram realizados o exame visual de solda, líquido penetrante, ensaio de tração, dobramento, dureza, exames macrográfico e metalográfico, análise química e verificação da taxa de diluição. Os resultados obtidos indicaram que o processo de soldagem por eletroescória, realizado com parâmetros adequados, é capaz de produzir revestimentos a altas taxas de deposição e mínimos valores para diluição, sem alterações microestruturais indesejadas na zona fundida. A análise química foi coerente com os resultados previstos pelo diagrama de Schaeffler, e corretamente a microestrutura e o teor de ferrita delta (δ) das soldas resultantes.

Palavras-Chave: Soldagem. Revestimento. Diluição.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to characterize the resulting microstructure after metallurgically dissimilar welding to lining a carbon steel weld with stainless steel. The research began for a literature focusing on the importance and need for the use of coatings and different materials base metals and the main characteristics resulting from the union of these materials. As a material for analysis were used two samples of carbon steel plate 25 mm thick, joined by submerged arc welding process (SAW). By electroslag welding process (ESW), it was deposited on stainless steel coating only on the carbon steel weld bead. As tests were carried out visual examination of welding, liquid penetrant, tensile testing, bending, hardness, macrograph tests and metallographic, chemical analysis and verification of the dilution rate. The results indicated that the electroslag welding process performed with suitable parameters, is able to produce coatings at high deposition rates and low values for dilution, without undesired microstructural changes in the melt zone. Chemical analysis was consistent with the results provided by the Schaeffler diagram, and correctly the microstructure and the delta ferrite content (δ) the resulting welds.

Keywords: Welding. Coating. Dilution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Revestimento de chapas por laminação: a) Desenho esquemático de laminação simples, b) Laminação em duas faces.	27
Figura 2 - a) Soldagem por explosão – Montagem em paralelo; b) Micrografia da linha de união formada por soldagem explosiva entre aço carbono e titânio, mostrando a interface ondulada, característica deste processo. Ampliação 80X.....	28
Figura 3 - Interface entre chapa de aço carbono revestida com aço inoxidável pelo processo de explosão, seguido de laminação a quente. Aumento 200X	28
Figura 4 - a) Cladeamento Overlay em tubo de processo; b) Moenda após receber aplicação de revestimento duro; c) Flange revestido para recuperação das dimensões originais, após desgaste; d) Esquema de soldagem por amanteigamento.....	31
Figura 5 - Princípio de operação da soldagem de revestimento	32
Figura 6 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda: a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento.....	32
Figura 7 - Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40%	33
Figura 8 - Soldagem por eletro-escória. (a) Esquema geral do processo. (b) Detalhe da região da poça de fusão	34
Figura 9 - Comparativo entre as taxas de deposição (kg/h) para processos de soldagem	37
Figura 10 – Soldagem de revestimento por eletroescória (ESSC) pode ser realizada por uma ou duas formas diferentes: (a) o fluxo é depositado por funil único que cobre a primeira extremidade da poça de fusão ou (b) por dois funis, que cobrem ambas as extremidades da poça de fusão	41
Figura 11 - Macrografia apresentando o efeito imposto por campos magnéticos sobre a soldagem por ESW. a) sem campo magnético; b) com campo magnético.....	43
Figura 12 - Diluição medida na seção transversal de uma solda.....	46
Figura 13 - Macrografia de uma solda de revestimento	46
Figura 14 - Aumento da difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função do aumento do nível de diluição	47
Figura 15 - Detalhe da junta	53
Figura 16 - Croqui e sequência de passes de soldagem.....	55
Figura 17 - Campo de visão.....	57

Figura 18 - Desenho esquemático para retirada de corpos de prova conforme padrão QW-463.1(b)	60
Figura 19 – Corpo-de-prova conforme ASME IX QW – 462.1 (a)	61
Figura 20 - Corpo-de-prova para ensaio de dobramento lateral conforme padrão ASME IX QW 462.2	62
Figura 21 - Ensaio de dobramento guiado, com ângulo de 180°	63
Figura 22 - Pontos de ensaio de dureza.	64
Figura 23 - Macrografia da região soldada e revestida.	65
Figura 24 - Desenho esquemático com orientações para análise química do revestimento.....	66
Figura 25 – Resistência a tração para o aço AS-516	68
Figura 26 - Perfil de dureza para chanfro V	72
Figura 27 - Gráfico representativo dos valores de dureza por zona do corpo de prova.	73
Figura 28 - Regiões de solda de um aço carbono	74
Figura 29 - Diagrama de Schaeffler representando a soldagem de revestimento	77
Figura 30 - Diagrama de Bystram indicando composição química sem restrições para a zona fundida.....	77
Figura 31 - Micrografias óticas da zona fundida do aço inox AISI 316L.	78
Figura 32 - Micrografias da zona fundida do aço inox AISI 316L mostrando a formação da ferrita delta.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de resistência à tração para aço ASTM A 516.	21
Tabela 2 - Espessuras máximas de chapas laminadas ASTM A 516	21
Tabela 3 - Aços inoxidáveis - Tipos, composição química e Limites de temperatura	23
Tabela 4 - Ligas de revestimento tipicamente usadas na indústria de petróleo.....	25
Tabela 5 - Composição química do metal de base	51
Tabela 6 - Composição química dos consumíveis conforme certificados de qualidade dos fornecedores (% em peso).	52
Tabela 7 - Temperatura de pré-aquecimento considerando aporte de 1,4 kJ/mm	54
Tabela 8 - Sequência de soldagem SAW.	55
Tabela 9 - Sequência de soldagem.	56
Tabela 10 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.	61
Tabela 11 - Dimensões para os corpos-de-prova utilizados no ensaio de dobramento lateral.	62
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração.	69
Tabela 13 - Ensaio Mecânicos requeridos para qualificação de EPS	70
Tabela 14 - Resultado da inspeção visual dos Corpos de Prova após o ensaio de dobramento.	71
Tabela 15 - Resultados obtidos com o ensaio de dureza.	72
Tabela 16 - Resultados de análise química do revestimento realizada por espectrometria ótica.	75
Tabela 17 - Ni equivalente e Cr equivalente para os metais de base e de adição.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Aporte de Calor</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute;</i>
ARBL	<i>Alta Resistência Baixa Liga</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers;</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials;</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
CE	<i>Carbono Equivalente</i>
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative</i>
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i>
EBSE	<i>Empresa Brasileira de Solda Elétrica S.A.</i>
EPS	<i>Especificação de Procedimento de Soldagem</i>
ESSC	<i>Electroslag Strip Cladding</i>
ESW	<i>Electroslag Welding;</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	<i>Metal de Base</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MPa	<i>Megapascal</i>
MS	<i>Metal de Solda</i>
NACE	<i>National Association of Corrsion Engineers</i>
SASC	<i>Submerged Arc Strip Cladding</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding;</i>
SI	<i>Sistema Internacional;</i>
SMAW	<i>American Society of Testing and Materials;</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UNS	<i>Unified Numbering System</i>
WRC	<i>Welding Research Council</i>

ZAC	<i>Zona afetada pelo calor;</i>
ZI	<i>Zona de Interface</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	Aspectos Gerais.....	15
1.2.	Objetivo Geral	16
1.3.	Objetivos Específicos	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1.	Seleção dos Materiais.....	19
2.2.	Aço ASTM A-516.....	20
2.3.	Emprego de aços especiais.....	21
2.4.	Aços Inoxidáveis	22
2.5.	Soldagem de Materiais dissimilares para aplicações de alto desempenho – Chapas Revestidas 24	
2.6.	Processo de revestimento por laminação.....	26
2.7.	Processo de Revestimento a explosão	27
2.8.	Processo de revestimento por soldagem.....	29
2.8.1.	Princípios de Operação.....	31
2.8.2.	Características do Processo	32
2.9.	Soldagem por Eletroescória	33
2.9.1.	Soldagem para união	33
2.9.2.	Soldagem para revestimento	36
2.10.	Revestimento de aço carbono com aços inoxidáveis	43
2.10.1.	Controle da taxa de diluição	45
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1.	Materiais.....	51
3.1.1.	Metal de base.....	51
3.1.2.	Materiais de adição.....	51

3.2.	Procedimento de Soldagem	52
3.3.	Exame visual de Solda	57
3.4.	Ensaio por Líquido Penetrante	58
3.5.	Ensaio Mecânicos	60
3.5.1.	Ensaio de tração	60
3.5.2.	Ensaio de dobramento	61
3.5.3.	Ensaio de dureza.....	63
3.6.	Exame macrográfico	64
3.7.	Ensaio Metalográfico	65
3.8.	Análise química.....	66
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1.	Exame Visual de Solda	67
4.2.	Ensaio por Líquido Penetrante	67
4.3.	Ensaio Mecânicos	68
4.3.1.	Ensaio de tração	68
4.3.2.	Ensaio de dobramento lateral	69
4.3.3.	Ensaio de dureza.....	71
4.3.4.	Exame Macrográfico	75
4.3.5.	Ensaio Metalográfico	75
5.	CONCLUSÃO	80
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aspectos Gerais

O desenvolvimento industrial proporciona o surgimento de novos materiais e ligas, com propriedades mecânicas e características específicas para as mais variadas aplicações. Neste contexto, o papel do Engenheiro Projetista é de unir as características desejadas, sempre preocupado com a segurança e a viabilidade financeira do projeto.

A criação de superligas metálicas com propriedades satisfatórias nem sempre é viável, seja por questões técnicas ou mesmo financeiras. No entanto, a união por soldagem dissimilar entre dois materiais distintos muitas vezes se apresenta como a melhor alternativa.

Para desenvolvimento desta pesquisa, foi selecionada como objeto de estudo a soldagem dissimilar de aço inoxidável austenítico como revestimento para chapas de aço carbono usadas na fabricação de vasos de pressão para a indústria petroquímica. Sabendo que a chapa de aço carbono já é fornecida revestida em uma de suas faces com uma camada de aço inoxidável, foram aplicados procedimentos específicos para soldagem de ambos os materiais das chapas, quando da fabricação do equipamento citado.

Dentre as principais características da soldagem de revestimento de aço carbono com aço inoxidável estão seus diferentes gradientes de temperatura e as mudanças microestruturais, que produzem grandes variações em suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Este é um processo de soldagem mais complexo, que além das dificuldades normais encontradas em qualquer processo, apresenta também outros problemas particulares que surgem em consequência da combinação de ligas de diferentes composições. Outro agravante é a adição de mais de uma camada e com diferentes tipos de metais, o que é comum em processo de revestimento de aço carbono com aço inoxidável.

Uma das variáveis mais importantes que devem ser observadas no caso da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis é o controle do percentual de diluição. As taxas de diluição devem ser controladas e ajustadas para garantir a qualidade final do revestimento, como a manutenção das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, além da geometria adequada do cordão de solda.

Para a pesquisa, o corpo-de-prova selecionado consiste de duas amostras de chapas de aço carbono ASTM A-516 Gr. 70, chanfradas, soldadas por processo de arco submerso (SAW), tendo o cordão de solda revestido por uma camada de aço inoxidável AISI 316L, depositada

por processo de soldagem por eletroescória, simulando o recobrimento da junta soldada de uma chapa inteiramente revestida.

O principal problema metalúrgico encontrado em soldas de metais dissimilares é a formação, ao longo da interface da linha de fusão, de regiões que podem atingir durezas superiores a 400 HV, o que indicaria presença de martensita e, portanto, de características frágeis da microestrutura. Como forma de prevenção ao aparecimento desta fase, o material foi pré-aquecido a uma temperatura maior ou igual a 25°C, e a temperatura máxima de 150°C entre passes. Os dados de dureza coletados durante os ensaios descartaram presença de fase martensítica após soldagem e revestimento. O ensaio por líquido penetrante não observou quaisquer descontinuidades na amostra, tais como trincas, falta de fusão e outras indicações lineares. O ensaio micrográfico observou microestrutura de matriz austenítica e ferrita delta nos espaços interdendríticos, enquanto que a análise química confirmou as propriedades mecânicas do material.

1.2. Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo caracterizar metalurgicamente a microestrutura resultante após soldagem dissimilar para revestimento de chapas de aço carbono com aço inoxidável. As chapas são fabricadas em aço carbono conforme Norma ASTM A-516 Gr. 70, soldadas por processo a Arco Submerso, sendo que este cordão de solda recebe uma camada de revestimento em aço inoxidável AISI 316L, depositada por processo de Eletroescória.

A pesquisa é resultado de uma parceria com a empresa EBSE – Empresa Brasileira de Solda Elétrica S.A., que busca introduzir a aplicação de revestimento dissimilar por Eletroescória. Como primeiro passo, a empresa passou por um processo de qualificação de procedimento de soldagem, realizando todos os ensaios necessários, e de onde foram retirados os materiais e resultados apresentados neste trabalho.

Do ponto de vista tecnológico, a empresa é a primeira no Brasil a se qualificar para utilização deste processo para acabamento de soldagem em vasos de pressão e tubos de grande diâmetro revestidos internamente em aço inoxidável. Estes equipamentos exigem controle rigoroso das soldas, sendo essencial o estudo da influência do revestimento sobre o cordão de solda de aço carbono, que é o responsável por garantir a resistência mecânica.

Do ponto de vista econômico, o processo de soldagem por Eletroescória é consideravelmente mais produtivo que os tradicionais, em se tratando de revestimento. A

introdução deste processo em uma linha de produção de *spools* e tubos de grande diâmetro representa importante ganho quanto ao custo final da obra.

1.3. Objetivos Específicos

De modo particular, este estudo objetiva compreender os problemas de soldabilidade do aço inoxidável austenítico em aço carbono, verificando as características resultantes da soldagem realizada por um processo inédito no Brasil.

Os principais problemas metalúrgicos encontrados em soldas de metais dissimilares 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 (Sun et al, 1994).

A análise química e a micrográfica são responsáveis por determinar a microestrutura da região soldada.

Foram realizados ainda, ensaio por líquido penetrante, para observação de descontinuidades na região soldada, e ensaio de tração, que indica se as características mínimas de resistência foram mantidas.

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 consequência, a qualidade do revestimento inox. Todos esses fatores necessitam ser avaliados antes da utilização em aplicações industriais (SUN et al, 1994).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um grande número de materiais metálicos pode ser empregado na fabricação de equipamentos e tubulações industriais, e entre todos esses metais, o aço carbono é o que tem maior uso e empregado na construção da grande maioria de equipamentos como vasos de pressão. Quando o aço carbono não resiste à corrosão ou erosão, ou quando este material pode ainda causar contaminação ao produto, são utilizadas outras ligas ou revestimentos de materiais mais resistentes, metálicos ou não metálicos, que são aplicados sobre o aço carbono afim de diminuir custos (SANTIAGO, s.d.).

Segundo TELLES (1991), são empregados revestimentos internos em vasos de pressão por duas razões principais:

- Evitar o contato de fluidos corrosivos com a parede metálica dos vasos (revestimentos anticorrosivos);
- Evitar o contato de fluidos em temperatura muito elevada com a parede metálica do vaso (revestimento refratário).

A vantagem dos materiais metálicos revestidos é que o produto final combina as propriedades superiores de cada metal — resistência, resistência à corrosão, baixo peso, menor custo e condutividade térmica e elétrica — para produzir um material superior a qualquer um dos dois metais individualmente.

As ligas para revestimento anticorrosivo geralmente utilizadas incluem revestimentos orgânicos, borrachas, aços inoxidáveis, ligas de níquel, ligas de cobre, titânio, e o zircônio, todos soldados aos aços carbono e de liga (adaptado de MULTICLAD, 2016).

Os aços inoxidáveis sofrem corrosão intergranular devido à formação de uma zona empobrecida em cromo ao longo dos contornos de grão, como consequência da precipitação, neste local, de carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6). Átomos de cromo desta região, que se encontravam em solução sólida no aço, difundem-se para os contornos de grão, formando carbonetos, diminuindo a resistência à corrosão. A prevenção da corrosão se faz empregando-se aços inoxidáveis austeníticos com teor de carbono inferior a 0.03% ou aços contendo elementos como nióbio ou titânio, que fixam o carbono, não o deixando livre para formar precipitados com o cromo¹.

¹ Disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAASVIAD/corrosao-intergranular>, acesso em 015/10/2016.

Os processos de revestimentos metálicos mais comum são a cladização, onde os clads constituem-se de chapas de um metal ou ligas, resistentes à corrosão, revestindo e protegendo um outro metal com função estrutural e podem ser aplicadas por pressão, laminação, solda e explosão².

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 sofrem forte influência de um processo de soldagem bem selecionado. Outros fatores técnicos envolvem a seleção do processo, incluindo as propriedades e a qualidade do revestimento, as características físicas da peça, as propriedades metalúrgicas do metal de base, a forma e composição da liga de revestimento e a habilidade do soldador (TELLES, 1991).

O controle de diluição é importante na soldagem de metais dissimilares, na deposição de revestimentos especiais sobre uma superfície metálica, na soldagem de metais de composição desconhecida, caso muito comum em soldagem de manutenção de materiais que tenham altos teores de elementos prejudiciais à zona fundida, como o carbono e o enxofre (IRVING, 1992).

2.1. Seleção dos Materiais

A seleção e especificação dos materiais adequados para cada serviço é frequentemente um dos problemas mais difíceis com que se confronta o projetista de vasos de pressão. Indicamos a seguir os principais fatores que influenciam a seleção de um material, em alguns casos, entretanto, poderá haver outros fatores determinantes desta seleção³:

- Fluido contido – natureza e concentração do fluido, impurezas e contaminantes, existência ou não de gases, temperatura, pH, caráter oxidante e redutor, entre outros.
- Condições de serviço – temperatura e pressão de operação.
- Nível de tensões o material;
- Natureza dos esforços mecânicos;
- Custo do material;
- Segurança;
- Forma de apresentação do material;

² Disponível em <ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM192/CAPITULO%205.ppt>, acesso em 04/10/2016.

³ Disponível em <file:///C:/Users/Helio%20Jr/Downloads/DIMENSIONAMENTO%20DE%20EQUIPAMENTOS%201%20-%20VASOS%20DE%20PRESS%C3%83O.pdf>, acesso em 15/10/2016.

- Facilidades de fabricação e montagem;
- Tempo de vida previsto;
- Experiência prévia;
- Facilidade de obtenção do material;
- Variações toleradas de forma ou dimensões da peça;

A decisão sobre o material para o vaso de pressão em uma planta normalmente não é tomada pelo engenheiro projetista do equipamento, que calcula a espessura de parede e que define os desenhos de fabricação. A decisão é tomada o quanto antes, na fase de engenharia básica, ou seja, durante o planejamento do projeto da planta. Neste estágio, alguns fatores afetam a escolha do material para as partes principais do vaso (HUPPERTZ, 1980).

2.2.Aço ASTM A-516

Esta especificação abrange chapas de aço carbono destinadas principalmente ao serviço em vasos de pressão soldados, onde melhoram ductilidade. De acordo com diferentes níveis de intensidade, as chapas de aço ASTM A516 estão disponíveis em quatro tipos: 55, 60, 65, e 70. A espessura máxima das placas é limitada apenas pela capacidade da composição para satisfazer os requisitos de propriedades mecânicas especificadas⁴.

Os diferentes graus de chapas para vasos de pressão ou caldeiras irão variar em função da pressão e o limite de escoamento a que estas serão submetidas em determinada temperatura de operação. As chapas A516 Gr 60 são destinadas a caldeiras e vasos de media pressão, as chapas A516 Gr 70 são destinadas a caldeiras e vasos de media e alta pressão, onde a economia de peso e secundaria, e as chapas A517 Gr B são destinadas a caldeiras e vasos de alta pressão, nos quais a economia de peso e relevante (ASTM, 1996).

A ASTM classifica este material em quatro graus diferentes, de acordo com seus níveis de resistência:

⁴ Disponível em <http://www.acosporte.com.br/aco-astm-a516>, acesso em 15/10/2016.

Tabela 1 - Limites de resistência à tração para aço ASTM A 516 (ASTM, 1996).

GRAU U.S. (SI)	Limite de Resistência à Tração ksi (Mpa)
55 [380]	55 - 75 [380-515]
60 [415]	60 - 80 [415-550]
65 [450]	65 - 85 [450-585]
70 [485]	70 - 90 [485-620]

Ainda segundo a Norma, as chapas podem ser fabricadas até grandes espessuras:

Tabela 2 - Espessuras máximas de chapas laminadas ASTM A 516 (ASTM, 1996).

GRAU U.S. (SI)	Espessuras Máximas Pol [mm]
55 [380]	12 [305]
60 [415]	8 [205]
65 [450]	8 [205]
70 [485]	8 [205]

As chapas de aço carbono A 516 são geralmente fornecidas no estado laminado a quente, a frio e recozido ou normalizado. Apresentam boa resistência mecânica e à corrosão atmosférica, resistência à fadiga e ao choque, boa maleabilidade e soldabilidade, sendo que para esta última característica, deve-se observar que durante a soldagem, ocorrem na ZAC regiões de alta dureza que estão sujeitas a trincas de corrosão sob tensão, quando exposta a um meio ambiente propício (RIBEIRO, 2001).

2.3. Emprego de aços especiais

Os aços carbono são conhecidos como aços de uso geral, já que podem ser usados em diversas aplicações, no entanto apresenta limitações técnicas, principalmente no que diz respeito a trabalho em baixas temperaturas e em meios corrosivos. Os aços-liga e os aços inoxidáveis apresentam propriedades não encontradas nos aços carbono, porém representam um custo muito maior em relação a este aço, tanto em sua produção, quanto na montagem e soldagem em instalações industriais, e seu uso deve ser justificado conforme sua real necessidade. TELLES (1991) cita como principais casos a seguir, em que se justifica o emprego dos aços especiais:

- Altas temperaturas: temperaturas acima dos limites de uso do aço carbono, ou dentro desses limites, porém quando é exigida maior resistência mecânica, resistência à fluência e à corrosão.
- Baixas temperaturas: para temperaturas inferiores -45°C, devido à suscetibilidade do aço carbono a fraturas frágeis.
- Alta corrosão – para serviços com fluidos corrosivos.
- Exigência de não contaminação – para o caso de indústrias alimentícias ou farmacêuticas, onde não é admissível a contaminação do fluido.
- Segurança – serviços com fluidos perigosos.

Existem três classes principais de aços-liga empregados para vasos de pressão: os aços-liga molibdênio e cromo-molibdênio, os aços liga níquel, e os aços liga manganês.

O aço-liga molibdênio e cromo-molibdênio contém até 1% de Mo e até 9% de Cr, em diversas proporções. O cromo aumenta a resistência à corrosão e à oxidação, além da resistência às altas temperaturas, sendo esses efeitos tanto mais acentuados quanto maior for a quantidade de cromo.⁵

O molibdênio influencia na estabilização do carboneto e aumenta a resistência à tração e a temperabilidade, além de ser resistente a altas temperaturas⁵.

Os aços-liga contendo níquel são materiais especiais para uso em temperaturas muito baixas. O Níquel refina o grão, diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço, aumenta a resistência à tração, a ductilidade⁵.

2.4. Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são classificados conforme sua microestrutura predominante, e podem ser austeníticos, ferríticos e martensíticos. Por serem facilmente soldáveis, os aços inoxidáveis austeníticos são usados para construção e revestimento anticorrosivo de equipamentos e tubulações. Para os outros aços inoxidáveis, não é recomendável seu uso como aço estrutural ou soldados, exceto para alguns aços ferríticos de teor de cromo até 17%, que apresentam soldabilidade não tão ruim, e têm um coeficiente de dilatação próximo ao do aço carbono. A tabela a seguir mostra os principais tipos de aços inoxidáveis:

⁵ Disponível em

http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/Projeto%20de%20fundição%20E7%E3o/_EFEITO%20Elementos%20de%20liga%20nos%20aços.pdf, acesso em 15/10/2016.

Tabela 3 - Aços inoxidáveis - Tipos, composição química e Limites de temperatura (TELLES, 1991).

Designação AISI	Estrutura Metalúrgica	Composição Nominal % Restante Ferro	Limites de Temperatura (°C)	
			Normas	Resistência mecânica aceitável
304	Austeníticos	0,08 C; 2,0Mn; 1,0Si 18 a 20 Cr; 8 a 10,5 Ni	815	600
304L		0,03 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 18 a 20 Cr; 8 a 12 Ni	430	400
304H		0,04 a 0,1 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 18 a 20 Cr; 8 a 10,5 Ni	815	650
304N		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 18 a 20 Cr; 8 a 10,5 Ni; 0,1 a 0,16 N	650	650
310		0,08 C; 2,0Mn; 1,0Si 24 a 26 Cr; 19 a 22 Ni	815	600
316		0,08 C; 2,0Mn; 1,0Si 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo	815	650
316L		0,03 C; 2,0Mn; 1,0Si 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo	430	400
316H		0,04 a 0,1 C; 2,0Mn; 1,0Si 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo	815	650
316N		0,08 C; 2,0Mn; 1,0 Si; 0,1 a 0,16 N; 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo	650	650
317		0,08 C; 2,0Mn; 1,0Si 18 a 20 Cr; 11 a 15 Ni; 3 a 4 Mo	815	600
321		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 17 a 19 Cr; 9 a 12 Ni; 5x % C Ti	815	550
347		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 17 a 19 Cr; 9 a 13 Ni; 8x % C Cb +	815	600
348		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 17 a 19 Cr; 9 a 13 Ni; 10x % C Cb	815	600
Designação AISI	Estrutura Metalúrgica	Composição Nominal % Restante Ferro	Limites de Temperatura (°C)	
			Normas	Resistência mecânica aceitável
403	Martensítico	0,15 C; 1,0Mn; 0,5Si 11,5 a 13 Cr		480
405	Ferrítico	0,08 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 11,5 a 14,5 Cr; 0,6 Ni; 0,1 a 0,3 Al	540	480
410	Martensítico	0,15 C; 1,0 Mn; 1,0Si 11,5 a 13,5 Cr; 0,75 Ni	650	500
410S	Ferrítico	0,08 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 11,5 a 13,5 Cr; 0,6 Ni	650	480
416	Martensítico	0,15 C; 1,0 Mn; 0,5Si 12 a 14 Cr; 0,6 Mo		480
429	Martensítico	0,12 C; 1,0 Mn; 1,0Si 14 a 16 Cr; 0,75 Ni	650	500
430	Ferrítico	0,12 C; 1,0 Mn; 1,0Si 16 a 18 Cr; 0,75 Ni	370	550
431	Martensítico	0,20 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 15 a 17 Cr; 1,5 Ni		500
440	Martensítico	0,60 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 16 a 18 Cr; 0,75 Mo		500
442	Ferrítico	0,20 C 18 a 23 Cr		550
446	Ferrítico	0,35 C 23 a 27 Cr	370	550

Observações

1. As porcentagens de C, Mn, Si e Ni são máximas, exceto onde indicado em contrário.
2. Os aços tipos 429 e 431 são na realidade mistos ferrítico-martensíticos.

Os altos valores de temperatura limite de utilização proporcionam aos aços austeníticos excelente resistência à oxidação e à fluência. Todos os austeníticos apresentam

comportamento dúctil, mesmo a baixas temperaturas, porém, no geral, estão sujeitos à sensitização quando submetidos a temperaturas entre 450°C e 850°C e podem apresentar corrosão intergranular, principalmente quando em meios ácidos. A corrosão intergranular pode aparecer tanto em trabalho a temperaturas elevadas, como também durante o processo de soldagem. A adição de titânio e nióbio ou a redução do teor de carbono são indicadas para controlar a sensitização (TELLES, 1991).

Para esta pesquisa, foi selecionado como metal de revestimento o aço inoxidável de norma AISI 316L, que é um aço cromo-níquel molibdênio, inoxidável austenítico, não-temperável, não-magnético. Possui resistência à oxidação até a temperatura de 875 °C, porém a resistência à corrosão intercristalina é garantida até a temperatura de 300 °C. A presença de molibdênio na composição química deste aço eleva sua resistência mecânica, além de aumentar a resistência ao ataque corrosivo em meios clorados e não oxidantes. Para evitar-se uma diminuição da resistência à corrosão, deve-se eliminar a carepa formada pelos processos de solda ou conformação a quente. Apresenta boa conformabilidade a frio, embora exija maiores esforços de conformação do que os aços não ligados. No estado solubilizado pode apresentar leve magnetismo que se eleva em função do grau de deformação a frio (FAVORIT, 2016).

Este aço é ainda destinado a fabricação de peças que exigem alta resistência à corrosão, tais como válvulas, tubos, recipientes, equipamentos hospitalares e farmacêuticos, peças para a indústria química, petrolífera, têxtil, de laticíneos, frigorífica, de tintas, entre outros. É indicado para a utilização em ambientes onde exista o ataque de substâncias corrosivas, tais como ácidos sulfúricos, ácidos sulfurosos, banhos clorados, soluções alcalinas, soluções salinas e várias outras (FAVORIT, 2016).

O aço tipo 316L é um variante do tipo 316 com um menor teor de carbono, com o limite de escoamento inferior e uma resistência à tração inferior. O 316L oferece melhor soldabilidade e também reduz a possibilidade de menor resistência à corrosão em torno das áreas soldadas (MCFARLANE, 2016).

2.5. Soldagem de Materiais dissimilares para aplicações de alto desempenho – Chapas Revestidas

O uso de ligas metálicas resistentes à corrosão em instalações e equipamentos para a indústria de Óleo e Gás se desenvolveu em conjunto com as novas tecnologias de processamento e exploração do petróleo e seus derivados. A extração do petróleo a grandes profundidades, a condução, o processamento e o aproveitamento dos componentes

encontrados no combustível fóssil exigem sistemas que utilizem materiais de alta resistência mecânica e capacidade de resistência à corrosão. Devido ao alto custo destas ligas, e a necessidade de somar as propriedades e características que nem sempre estão presentes em um único material, foram desenvolvidas técnicas que possibilitam a união de materiais dissimilares de forma econômica e eficiente.

Se inicialmente as despesas para produção de chapas revestidas muitas vezes parecem ser elevadas, o uso deste material proporciona economia com manipulação segura do fluido corrosivo, redução de peso e espaço, visto que os aços de alta resistência permitem espessuras de parede menores, e não necessidade de uso de inibidores de corrosão. Os aços revestidos por processos de soldagem dissimilar são produzidos com a finalidade de proporcionar uma utilização eficaz de ligas mais caras. As camadas que entram em contato com fluidos corrosivos são compostas por aços resistentes a corrosão, enquanto que as camadas externas fornecem a força e a resistência necessária para manter a integridade mecânica (SMITH, 2012).

Segundo SMITH (2012), a seleção de aço revestido requer tomada de decisões em relação a:

- a escolha ideal de combinação de metal de base e do revestimento
- a seleção do método de fabricação adequado para a parte que é revestida.
- a aplicação na fabricação.

Tabela 4 - Ligas de revestimento tipicamente usadas na indústria de petróleo (SMITH, 2012).

Ligas de revestimento tipicamente usadas na Indústria de Petróleo							
COMPOSIÇÃO NOMINAL (Peso %)							
	Designação UNS	C _{máx}	Cr	Ni	Mo	Cu	Outros
Liga 304L	S30403	0.030	18-20	8-10	-	-	-
Liga 316L	S31603	0.030	16-18	11-13	2-3	-	-
Liga 904L	N08904	0.020	20	25	4.5	1.5	-
Liga 825	N08825	0.020	21	42	3	2	-
Liga 625	N06625	0.030	21.5	58 min	9	-	Nb 3-6
Liga C22	N06022	0.01	20-22.5	bal	12.5-14.5	-	Fe 2.6, W 3
Liga C276	N10276	0.01	15.5	bal	16	-	Fe 4-7, W 3.75
Liga 400	N04400	-	-	63 min	-	31	Fe 2.5
90/10 CuNi	C70600	-	-	10	-	bal	Fe 1.5, Mn 1
70/30 CuNi	C71500	-	-	30	-	bal	Fe 0.6

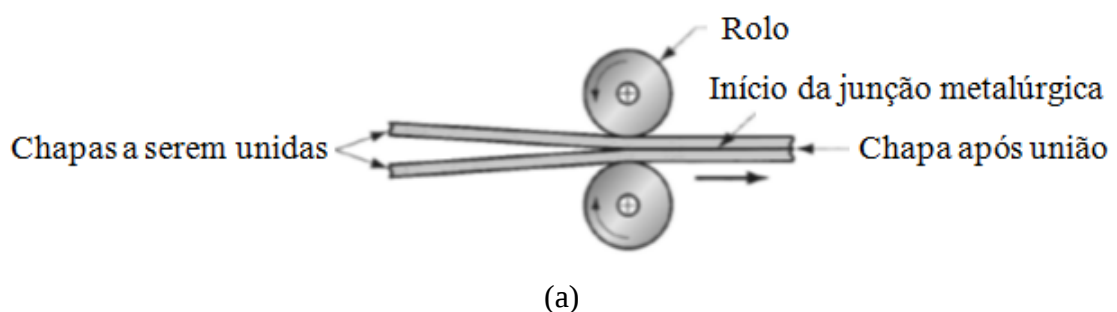
As chapas revestidas podem ser produzidas por laminação a quente, por explosão e por sobreposição de solda.

2.6. Processo de revestimento por laminação

As chapas laminadas a quente representam mais de 90% das chapas revestidas do mundo. O procedimento de fabricação consiste em uma preparação separada do aço suporte e do material de revestimento, polimento e limpeza química. Neste processo, a laminação induz a difusão entre o material de revestimento e o material de base, e em certas combinações pode resultar no endurecimento da interface em função da precipitação de fases intermetálicas ou de carbonetos. Para prevenir a formação de óxidos de cromo e a ocorrência destas fases intermetálicas, alguns fabricantes galvanizam a superfície com ferro ou níquel antes da laminação, no entanto o controle da composição química dos metais, principalmente no que diz respeito ao teor de carbono, também evita a precipitação de carbonetos nas zonas de interface (SMITH, 2012).

Ainda segundo SMITH (2012), as vantagens de se produzir chapas revestidas por laminação são, em primeiro lugar, a inexistência de contato entre a camada de revestimento e os cilindros de aço do equipamento durante a laminação. Outra vantagem é que este processo permite a produção de chapas finas sem ocorrência de distorções e “enrolamento” da chapa, pois o alongamento da chapa de revestimento é compensado pelo da chapa de base.

Durante a laminação, o aumento da área de superfície das chapas provoca a quebra dos óxidos da camada superficial, permitindo o contato metal-metal entre o material de revestimento e o de base, formando então uma ligação metálica no estado sólido. A laminação normalmente é seguida de tratamento térmico, que leva o material de revestimento ao estado de solução recozida e o material de base à temperatura desejada, seja para normalização, têmpera ou outro processo. Para o caso dos aço inoxidáveis austeníticos, a temperatura ideal é de 950°C (SMITH, 2012).





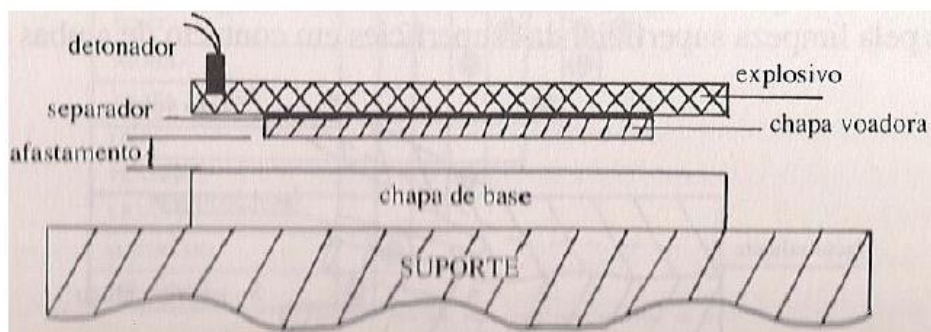
(b)

Figura 1 – Revestimento de chapas por laminação: a) Desenho esquemático de laminação simples (www.slideplayer.com, 2016), b) Laminação em duas faces (www.emsclad.com, 2016).

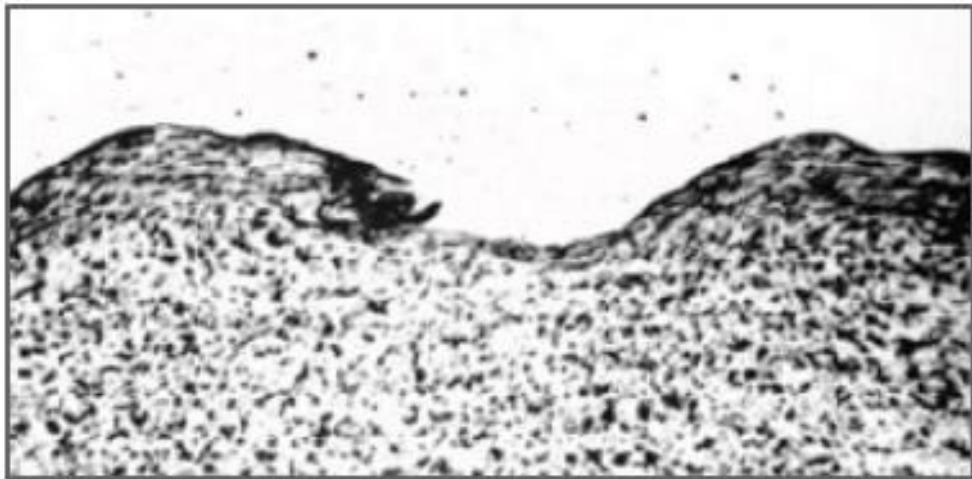
2.7. Processo de Revestimento a explosão

O processo consiste na detonação controlada que produz energia usada para promover uma união no estado sólido entre componentes metálicos. O processo pode ser usado para soldar praticamente qualquer combinação entre metais, e unir um ou mais revestimentos em ambas as faces do metal de base, mesmo de um metal ou liga diferente (SMITH, 2012).

Neste tipo de soldagem, a explosão produz uma solda pelo impacto em alta velocidade das peças em trabalho, que remove o filme de óxido das camadas superficiais, ao mesmo tempo em que cria uma ligação metálica entre as chapas. A solda é produzida sem a adição de metal. O processo ocorre à temperatura ambiente, sendo desnecessário um grande aquecimento das peças em trabalho, no entanto, as superfícies de contato são aquecidas pela energia de colisão, e a soldagem é conseguida pelo fluxo plástico do metal em suas superfícies (SMITH, 2012).



(a)



(b)

Figura 2 - a) Soldagem por explosão – Montagem em paralelo (<http://ftp.demec.ufpr.br>, 2016); **b)** Micrografia da linha de união formada por soldagem explosiva entre aço carbono e titânio, mostrando a interface ondulada, característica deste processo. Ampliação 80X (SMITH, 2012).

Uma maneira mais econômica de se realizar a soldagem por explosão é a realização, logo após o processo, de laminação a quente que aumenta a área fundida, reduzindo assim o custo por unidade de área. O processo de laminação a quente tende a suavizar as ondulações na interface (SMITH, 2012).



Figura 3 - Interface entre chapa de aço carbono revestida com aço inoxidável pelo processo de explosão, seguido de laminação a quente. Aumento 200X(SMITH, 2012).

Segundo SMITH (2012), na maioria dos casos não é necessária realização de tratamento térmico após o revestimento por explosão, portanto quase todas as combinações de revestimento e materiais de revestimento podem ser escolhidas.

Em termos de qualidade (percentual de área revestida e resistência do revestimento), as diferenças entre chapas revestidas por explosão e por laminação são muito pequenas. Em ensaios de cisalhamento, as chapas revestidas por explosão apresentam valores de resistência maiores, quando comparadas com os corpos de prova extraídos de chapas revestidas por laminação. Além disso, ambos excedem confortavelmente o valor mínimo especificado de 140 MPa para resistência ao cisalhamento (SMITH, 2012).

2.8. Processo de revestimento por soldagem

A soldagem de revestimento é definida pela AWS como a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas.

Basicamente, este processo é empregado quando se deseja uma das seguintes aplicações:

- Prorrogação da vida útil de peças que não possuem todas as propriedades necessárias para uma dada aplicação;
- Recuperação de elementos afetados pelo desgaste ou corrosão;
- Criação de superfícies com características especiais.

PALANI E MURUGAN (2006) argumentam que os componentes industriais estão sujeitos aos mais diversos tipos de desgaste, o que demanda manutenções frequentes e faz com que os custos de suas substituições sejam elevados. Consequentemente, a extensão da vida útil de tais componentes pode resultar em economias significativas.

Portanto, os diversos metais de adição são depositados com a finalidade de melhorar as propriedades de resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência a altas temperaturas, aumento da dureza, controle dimensional ou para obtenção de algumas necessidades metalúrgicas (MURUGAN e PARMAR, 1997). Tais características contribuem para que a soldagem de revestimento apresente as seguintes vantagens:

- Melhoria das propriedades superficiais no local desejado;
- Fácil uso de materiais de dureza elevada e ligas resistentes ao desgaste;
- Aplicação rápida do processo de revestimento;
- Uso econômico de elementos de liga de custos elevados;
- Proteção das peças;
- Obtenção de economias em função da extensão da vida útil dos componentes, redução de manutenção, substituição e recuperação de peças desgastadas, utilização de materiais base

de baixo custo, redução do consumo de energia em serviço, aumento da eficiência dos componentes.

Existem vários tipos de soldagem para revestimento, dentre eles o revestimento anticorrosivo, revestimento duro, enchimento e amanteigamento. As chapas produzidas pelo processo de revestimento anticorrosivo por soldagem apresentam uma camada relativamente espessa de metal de revestimento, aplicada a uma base de aço carbono ou de baixa liga, com o objetivo de proporcionar resistência à corrosão a essa superfície (ASM, 1994).

O processo de soldagem de revestimento duro é aplicado em peças que trabalham em condições extremas de desgastes por atrito, abrasão e a própria ação de corrosão do caldo durante o processo de moagem da cana, são peças como : camisas de moenda, flanges, pentes, bagaceiras, martelos, facas e rodets. A soldagem do revestimento duro geralmente é realizada manualmente, através de eletrodo revestido, porém, no caso de soldagem de camisas de moenda, pode-se optar pelo processo semi-automático com arame tubular, que tem melhor custo benefício (QUALITY, 2016).

O termo enchimento refere-se à adição de metal de solda em uma superfície do metal de base com a finalidade de restaurar as dimensões originais do metal. As ligas metálicas para enchimento não são projetadas para resistir ao desgaste, mas sim para reestabelecer as dimensões originais da peça ou equipamento, ou ainda como base para posterior aplicação de revestimento duro (ASM, 1994).

O amanteigamento também envolve a adição de uma ou mais camadas de metal de solda sobre a superfície do metal de base, porém é usado para satisfazer alguma consideração metalúrgica. É usado principalmente em soldagem de materiais dissimilares (ASM, 1994).



(a)



(b)

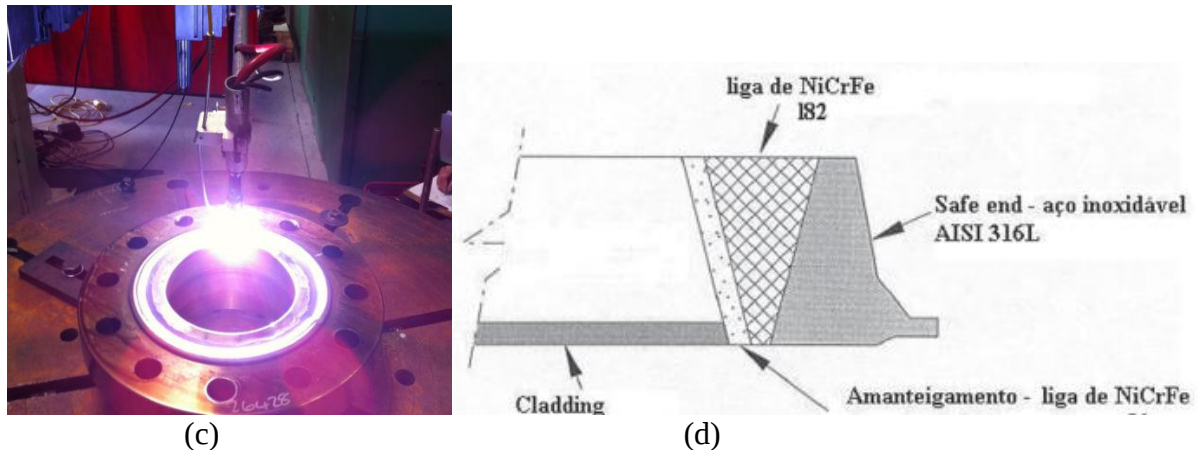


Figura 4 - a) Cladeamento Overlay em tubo de processo (<http://pms-co.net>, 2016; **b)** Moenda após receber aplicação de revestimento duro (www.qualitysoldagens.com.br, 2016); **c)** Flange revestido para recuperação das dimensões originais, após desgaste (www.arcenergy.co.uk, 2016); **d)** Esquema de soldagem por amanteigamento (LIMA, 2010).

2.8.1. Princípios de Operação

Os revestimentos são geralmente depositados por processos de soldagem a arco elétrico ou gás combustível (PHILLIPS, 1965).

Alguns cuidados importantes no uso da soldagem de revestimento devem ser tomados em relação à geometria da peça, custo do procedimento de soldagem, desenvolvimento de trincas ou distorções a partir das tensões térmicas de soldagem e a qualidade desejada do revestimento. A qualidade do material depositado varia amplamente, dependendo da aplicação, do material utilizado e da habilidade do soldador (GOMES, 2010).

Com isso, o processo de revestimento ocorre de forma que os cordões sejam depositados lateralmente e com um dado nível de sobreposição até que toda a região de interesse seja recoberta conforme a figura 5. O nível de sobreposição dos cordões depende da aplicação do revestimento e do processo de soldagem empregado (GOMES, 2010).

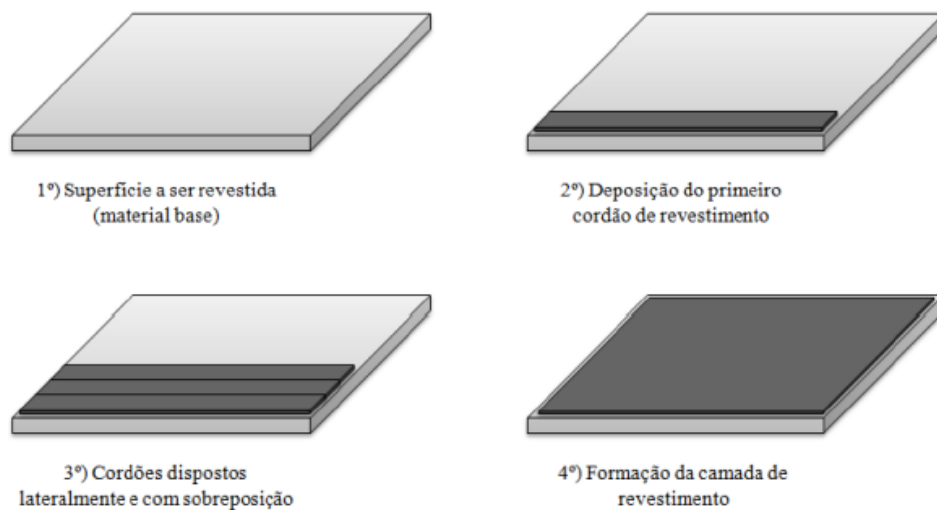


Figura 5 - Princípio de operação da soldagem de revestimento (GOMES, 2010).

2.8.2. Características do Processo

A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem diz respeito à geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada, ver figura (6a), na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D), ver figura (6b). 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. Assim, um dos maiores desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado dos parâmetros do processo para que o material depositado adquira a geometria desejada (GOMES, 2010).

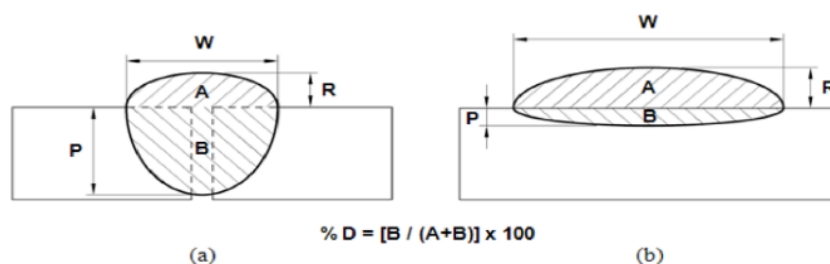


Figura 6 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda: **a)** união da junta soldada (aplicações convencionais); **b)** soldagem de revestimento (GOMES, 2010).

A figura (7) descreve o perfil geométrico desejado, segundo KANNAN E MURUGAN (2006), após a deposição de três cordões com uma sobreposição de 40% para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis duplex.

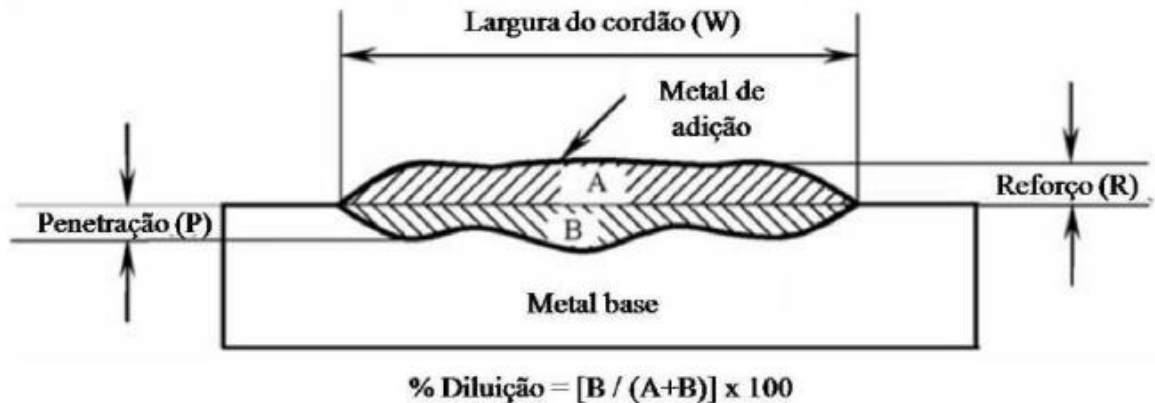


Figura 7 - Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40% (Adaptado de KANNAN e MURUGAN, 2006).

2.9. Soldagem por Eletroescória

2.9.1. Soldagem para união

A soldagem por eletroescória, em inglês *Eletroslag Welding*, ESW, consiste num processo de soldagem por fusão que utiliza a passagem de uma corrente elétrica através de uma escória condutora fundida para gerar o calor necessário à fusão localizada da junta e do metal de adição. A escória também tem a função de proteger a poça de fusão e o metal de adição de uma contaminação pelo ambiente. O processo é realizado em um único passe com a soldagem sendo feita na posição vertical ascendente, e tem aplicação principalmente para união de peças de grande espessura (MODENESI e MARQUES, 2000).

O material fundido é mantido em posição com o auxílio de sapatas de resfriamento, em geral de cobre e refrigeradas a água (MODENESI e MARQUES, 2000).

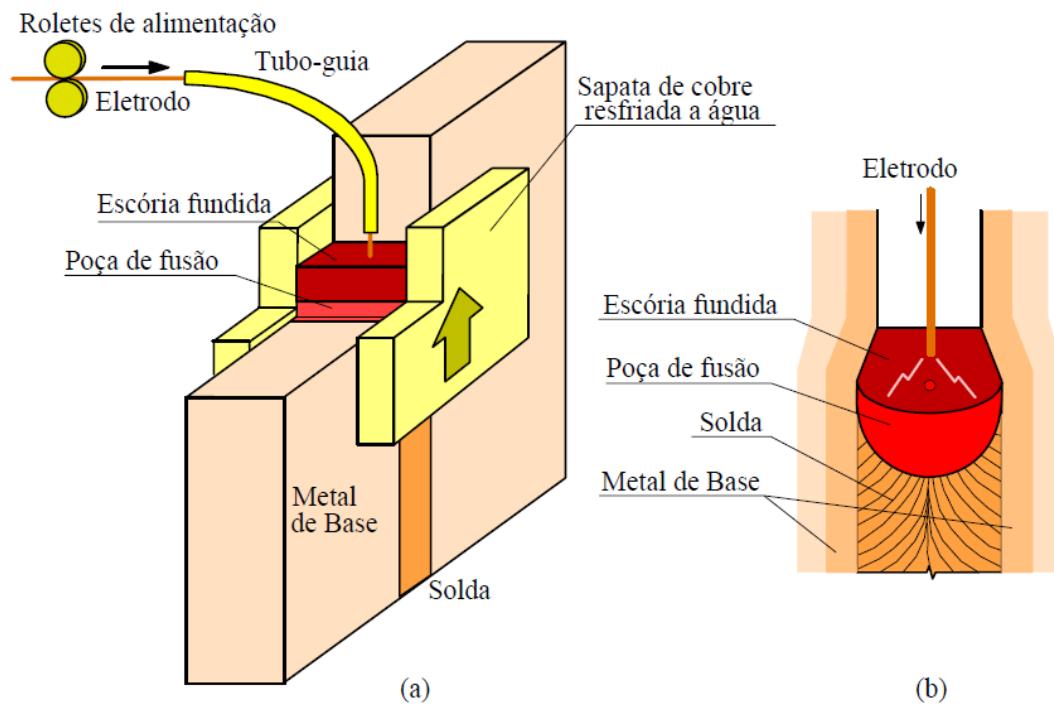


Figura 8 - Soldagem por eletro-escória. **(a)** Esquema geral do processo. **(b)** Detalhe da região da poça de fusão (<http://cursos.unisanta.br>, 2016).

O processo pode seguir dois métodos diferentes: o método tradicional, onde o tubo guia não é consumido e o cabeçote é movido progressivamente durante o processo, mantendo uma distância constante à poça de fusão, e o segundo método, no qual o tubo guia é consumido juntamente com o arame e o cabeçote permanece estacionário no alto da junta. Como o tubo guia é feito de um material compatível com o metal de adição, ele é progressivamente fundido com o arame à medida que a solda é depositada. Essa configuração é mais simples, dispensando o uso de dispositivos para a movimentação do cabeçote (MODENESI e MARQUES, 2000).

O processo de soldagem por eletroescória é altamente produtivo, chegando a atingir taxas de deposição de até 13kg/h por eletrodo. A utilização de sistemas de múltiplos arames para qualquer um dos métodos é comum em juntas de grandes espessuras. O processo é usado tipicamente em juntas de 13 a 500 mm de espessura, porém, como a velocidade de soldagem deste processo tende a ser muito baixa (cerca de 0,5 mm/s), a solda e o metal de base adjacente tendem a apresentar uma estrutura de granulação grosseira e de tenacidade baixa, visto que regiões do metal de base adjacentes são aquecidas a temperaturas muito elevadas por períodos longos e resfriadas lentamente, sendo necessária, em alguns casos, a realização de um tratamento térmico de normalização após a soldagem, para o refino da estrutura (MODENESI e MARQUES, 2000).

Segundo GIMENEZ E CLARA (1995), o processo de soldagem por eletroescória tem aplicação aos seguintes campos:

- Construções metálicas: Soldas em chapas grossas de topo.
- Construção naval: Solda de seções do navio e laterais de tanques.
- Construção de recipientes, vasos de pressão: Costuras longitudinais e circulares.
- Técnica nuclear: Partes de componentes para usinas nucleares.
- Construção de máquinas: Carcaças para turbinas, cilindros, eixos, bases para máquinas.
- Construção de vagões ferroviários: superfícies de rolamento, jogos de rodas.

Possui como vantagens:

- Preparação do chanfro a baixo custo, por meio de oxi-corte, pois não há tolerâncias críticas a serem consideradas.
- O processo lento de solidificação é favorável, do ponto de vista metalúrgico, para as reações químicas na poça de fusão. O metal depositado é bem desgaseificado e livre de poros, tampouco mostra endurecimento, conferindo alta qualidade da junta soldada.
- Devido ao resfriamento lento surgem tensões próprias da solda consideravelmente mais baixas do que em soldas executadas por outros processos.
- Solda sem distorções, o que evita trabalhos, de ajustamento, muito onerosos (INFOSOLDA, 1997).

Possui como desvantagens:

- Granulação grosseira, com baixa resistência ao impacto, sendo necessário tratamento térmico posterior.
- Alto custo dos dispositivos de soldagem.
- Mão-de-obra especializada é recomendada na operação.
- A soldagem só pode ser feita na posição vertical ascendente, e tem que ser iniciada preferencialmente a soldagem uma única vez.
- Solda seções acima de 19 mm (INFOSOLDA, 1997).

Este processo pode ser também utilizado para soldar ou revestir chapas com espessuras acima de 25 mm, em posição vertical ou quase vertical e com grande aporte de energia, em

comparação a outros processos de soldagem à arco, o que pode resultar em características mecânicas, geralmente, inferiores na ZAC (RAO, 2012).

2.9.2. Soldagem para revestimento

Revestimentos metálicos podem ser aplicados por diversos processos, mas um dos mais flexíveis é o processo de revestimento por soldagem. Todos os processos de soldagem podem ser usados para revestimento, porém problemas com requisitos físicos fazem com que alguns processos sejam mais adequados que outros. Por exemplo, a soldagem TIG (GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*) não é adequada para revestimento de grandes peças ou áreas, que precisam de grande quantidade de material de revestimento. Por outro lado, a soldagem de revestimento pelo processo TIG pode ser uma excelente opção para revestimento em áreas restritas, como a face interna de uma válvula de pequeno diâmetro, por exemplo (JEIRUD e KEULTJES, 2015).

Processos de revestimento por soldagem com fitas são bem adequadas para aplicações que requerem altas taxas de deposição. Eles têm sido usados ao longo de décadas. Um dos processos mais utilizados, a soldagem de revestimento com fitas a arco submerso (SASC – *Submerged Arc Strip Cladding*), também é uma das mais produtivas, oferecendo taxas de deposição de cerca de 22 Kg por hora (JEIRUD e KEULTJES, 2015).

No entanto, as tecnologias mudam, e os avanços em materiais de consumo fizeram com que a soldagem de revestimento com fita por eletroescória (ESSC – *Electroslag Strip Cladding*) se tornasse uma boa alternativa à SASC em algumas aplicações, tais como indústria de petróleo e gás, fabricação de vasos de pressão, e indústria petroquímica.

Para a aplicação de revestimentos em grandes áreas de cobertura utilizando os processos de soldagem a arco submerso (SAW) e eletroescória (ESW) com fitas, geralmente são mais econômicos, em função da sua alta produtividade, conforme se pode verificar na Figura 9, que apresenta um quadro comparativo de taxa de deposição para diversos processos de soldagem (BRANDI, 2008).

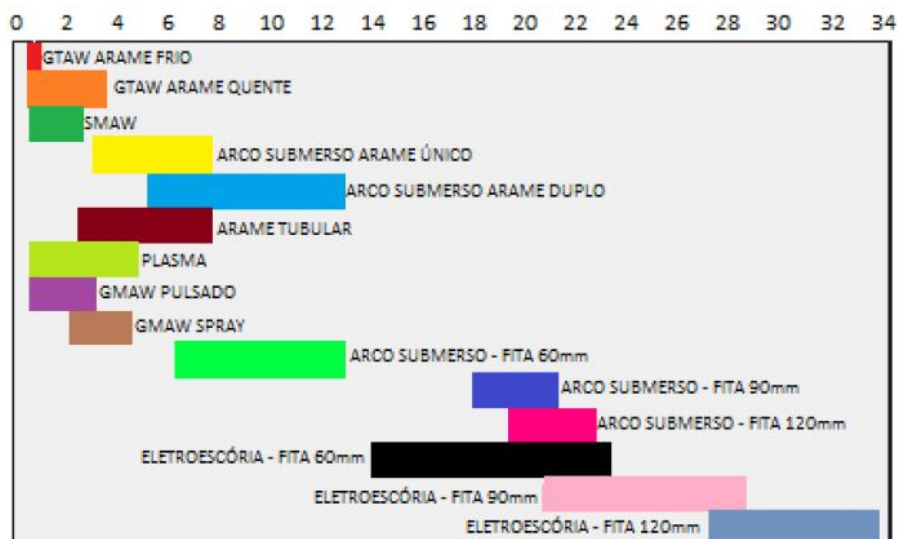


Figura 9 - Comparativo entre as taxas de deposição (kg/h) para processos de soldagem (BRANDI, 2008).

O processo de soldagem ESW com a utilização de fitas como consumível para a aplicação de revestimentos metálicos, foi desenvolvido no início da década de 70, a fim de aumentar a produtividade através do incremento da taxa de deposição e, conseqüentemente, menor taxa de diluição, quando comparado a outros processos de soldagem, inclusive o processo SAW, com fitas como consumível de soldagem (PATEL, 2013).

O processo ESSC pode economizar tempo e gastos com materiais consumíveis e proporciona maior taxa de deposição. SASC e ESSC são as designações formais, mas os processos comumente são chamados SAW (*Submerged Arc Welding*) e ESW (*Electroslag Arc Welding*) para designar, respectivamente, os processos a arco submerso e por eletroescória (JEIRUD e KEULTJES, 2015).

ESSC e SASC são processos semelhantes, mas diferem quanto ao conceito em que SASC usa um arco, enquanto ESSC é um processo de aquecimento de resistência. O arco em SASC corre ao longo de toda a largura da tira. Devido a penetração da poça de fusão no material de base, os níveis de diluição são tipicamente cerca de 20 por cento (JEIRUD e KEULTJES, 2015).

Segundo MODENESI (2005), BRANDI (2008), MADALENA (2013) E PAREKH (2016), em comparação ao processo SAW, pode-se afirmar que o ESW apresenta:

- A penetração atingida é devido ao fato de a poça de escória fundida ser usada para derreter a fita e parte do material de base;
- Maior taxa de deposição de 60% a 80%.

- Menor diluição do metal de base (10 -15% diluição).
- Menor voltagem de arco (24 - 26 V).
- Maiores amperagens e densidade de corrente.
- Fluxos especialmente desenvolvidos para altas produtividades, que favorecem a soldagem com amperagens acima de 2000 A, com a correspondente densidade de corrente de cerca de 70 A/mm².
- Maior velocidade de soldagem (50%-200%), resultando em elevada capacidade de revestir grandes áreas em m²/h.
- Aporte de calor similar.
- Menor consumo de fluxo. (cerca de 0.4 kg/kg).
- Menor taxa de solidificação do metal de solda, o que proporciona melhor desgaseificação, resultando em menos porosidade.
- Metal depositado é mais limpo do ponto de vista metalúrgico e menos sensível a trincas à quente e corrosão.
- Maior produtividade
- Preparação da junta relativamente fácil.
- Sem pré-aquecimento para chapas muito grossas, devido à baixa taxa de resfriamento.
- Sem necessidade de limpeza interpases.
- Distorção angular mínima.
- Não é requerida grande habilidade do soldador, pela facilidade de controle do processo, existe pequena interferência do soldador no processo, devido a alta mecanização.
- Econômico quando aplicado em chapas de espessuras grandes.
- Geração de calor muito alta, o que resulta em taxa de resfriamento muito lenta, provocando dessa forma reações na metalurgia dos materiais como, estrutura grosseira no metal de solda com propriedades mecânicas anisotrópicas, solidificação induzida pela alta textura de granulometria do material e segregação de elementos que provocam trincas a quente no centro da solda e granulometria grosseira na ZAC que é mais susceptível a fratura frágil.
- Impróprio para materiais com espessuras muito finas (19 mm).
- Soldagens na posição vertical ou próximo dela.
- Reparo de solda no processo ESW, requer a utilização de outro processo de soldagem para realizar a recuperação.

O processo ESSC utiliza um sistema de alimentação com a fita, e o arame é alimentado através de uma pistola, como num processo típico de soldagem com arame. Devido o processo ESSC não ser um processo a arco, o aquecimento é feito através do fluxo, que é condutor. O calor provoca fusão da fita e do material de base em uma escória líquida, que é então transferido para o metal fundido que é depositado sobre o material de base. A fita é depositada na parte superior do sistema de escória criado pelo fluxo, protegendo a solda, conforme figura 10 (JEIRUD e KEULTJES, 2015).

Os fluxos utilizados para este processo de soldagem são fundidos e possuem maior resistividade em comparação ao aglomerado utilizado em processos a arco, devido ao fato do arco ser extinto logo após o processo se tornar estável. Em alguns casos, principalmente quando a corrente não for elevada, fluxos aglomerados de partida, com condutividade elevada, podem ser utilizados para iniciar o processo e formar a poça de fusão (MODENESI, 2005, BRANDI, 2008 e MADALENA, 2013).

Após esta etapa, um fluxo contínuo de resistividade elevada é adicionado, a fim de gerar calor para fundir o metal de adição e manter a operação de soldagem estável. Um fluxo de resistência elevada consome menos corrente, resultando em uma poça de fusão mais fria e com menor penetração, permitindo que o consumível penetre mais na poça de fusão, mas em contra partida, um fluxo de baixa resistência pode consumir corrente excessiva, aumentando a temperatura da poça até o processo se estabilizar com extensão mais curta do eletrodo, além da possibilidade de ocorrer formação de arco entre o consumível e a superfície da escória, especialmente com tensões mais elevadas. Esta condição é agravada no caso de fluxos apresentando condutividade fortemente crescente com a temperatura. Em termos de condições do processo, menor resistividade da escória pode resultar em operar a tensão mais baixa (MODENESI, 2005, BRANDI, 2008 e MADALENA, 2013).

Além de sua capacidade de gerar calor, a escória fundida deve possuir fluidez suficiente para provocar convecção rápida e boa circulação, necessárias para distribuição do calor, através da solda, sendo que esta fluidez depende principalmente de suas características químicas e da temperatura operacional (MODENESI, 2005, BRANDI, 2008 e MADALENA, 2013).

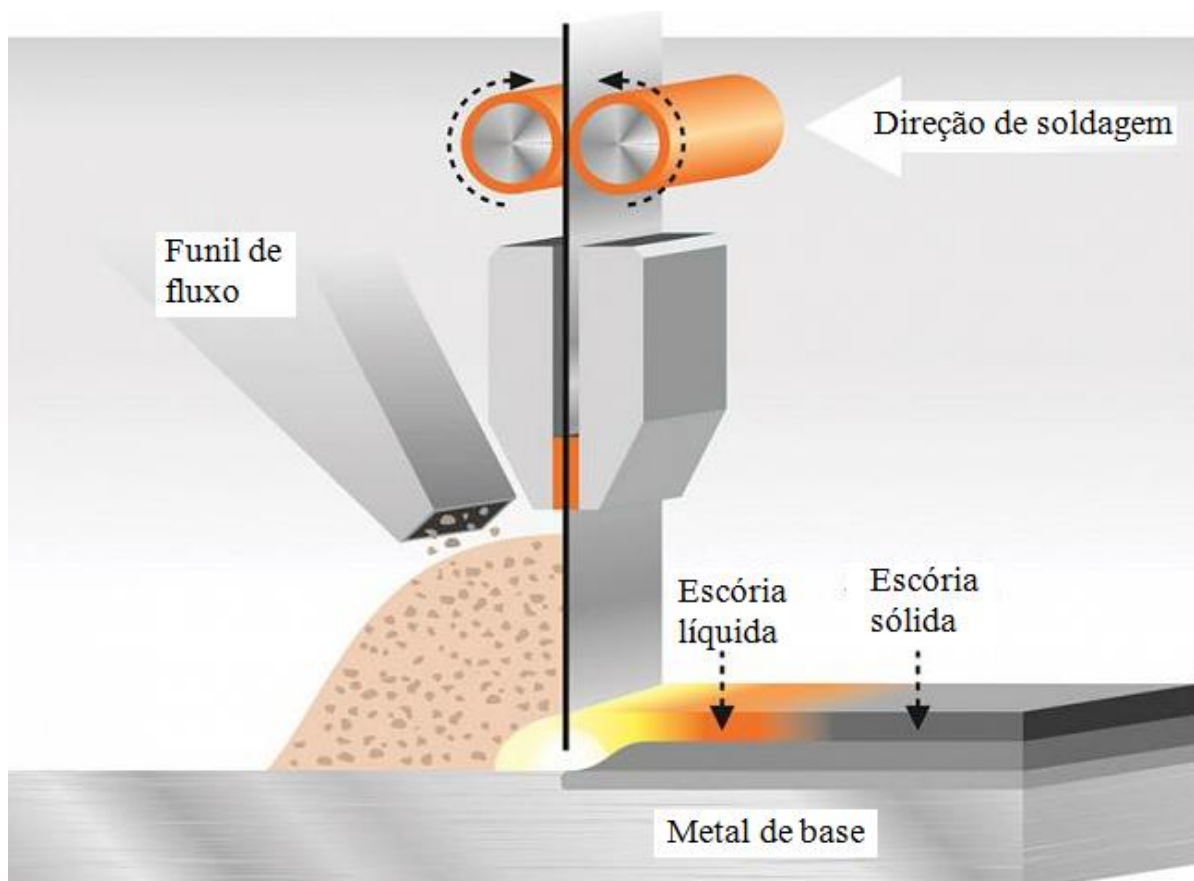
O ponto de fusão de um fluxo deve ser inferior ao do metal base para que ocorra o refino da poça e sua temperatura de ebulição deve ser superior à temperatura operacional, a fim de se evitar perdas por vaporização (BRANDI, 2008).

A taxa de diluição da soldagem ESSC é baixa, normalmente cerca de 10 por cento, e proporciona favoráveis taxas de deposição, velocidades de deslocamento e consumo de fluxo.

O *heat input* (energia de soldagem) de ambos os processos é comparável (JEIRUD e KEULTJES, 2015).

Uma vez que a taxa de diluição com ESSC é mais baixa, o processo muitas vezes pode ser realizado com aplicação de apenas uma camada de material de revestimento, a uma velocidade de soldagem padrão, ao passo que duas camadas são necessárias quando se utiliza um fluxo ESSC de alta velocidade. Isto reduz o custo de consumo pela metade. A velocidade de deslocamento típico oferecido pelo processo ESSC é o dobro do SASC: 250 mm por minuto contra 125 mm/min. Além disso, o processo ESSC tem uma elevada taxa de deposição, em alguns casos atingindo 25 Kg/h (JEIRUD e KEULTJES, 2015).

Outro benefício da economia de tempo que o processo de ESSC proporciona, decorre do aperfeiçoamento da eletroescória, que ocorre quando o metal fundido passa através da poça de fusão. Isto resulta em metal de solda mais limpo, com níveis mais baixos de oxigênio, o que significa menor necessidade de limpeza após soldagem para algumas aplicações (JEIRUD e KEULTJES, 2015).



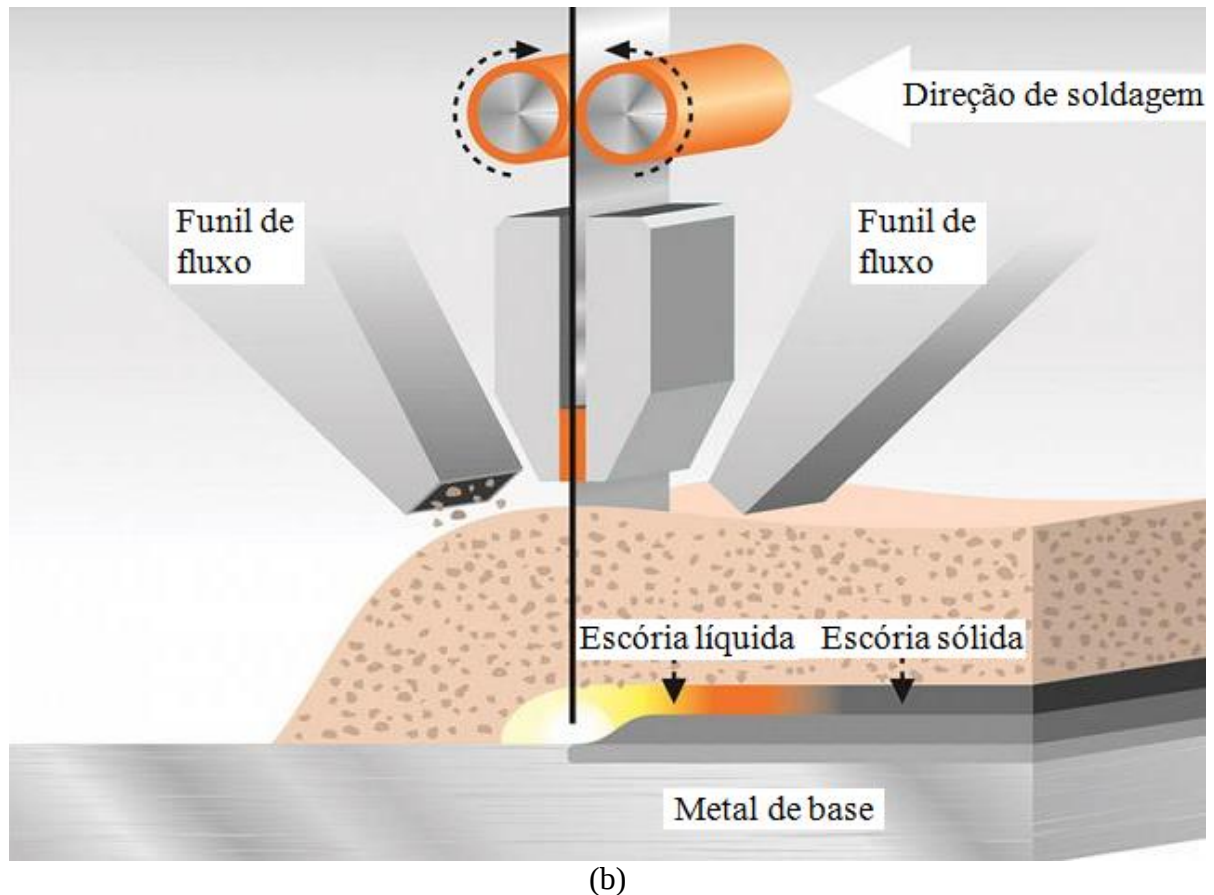


Figura 10 – Soldagem de revestimento por eletroescória (ESSC) pode ser realizada por uma ou duas formas diferentes: **(a)** o fluxo é depositado por funil único que cobre a primeira extremidade da poça de fusão ou **(b)** por dois funis, que cobrem ambas as extremidades da poça de fusão (JEIRUD e KEULTJES, 2015).

Os revestimentos aplicados por processos de soldagem que conseguem atingir as composições químicas especificadas em uma só camada são bastante apropriados para revestimentos com ligas de Ni, pois estes materiais podem sofrer com o surgimento de trincas, com o reaquecimento de depósitos subjacentes, pois com a deposição de uma camada não surgirão trincas de liquefação (BRANDI, 2008 e PATEL, 2013). Se a aplicação de mais de uma camada de revestimento for requerida, cuidados devem ser tomados, como o controle do aporte térmico, pois com o reaquecimento da primeira camada, as regiões interdendríticas podem fundir e produzir trincas (MADALENA, 2013).

Alguns tratamentos térmicos após a aplicação de revestimentos podem ser requeridos, se a dureza ZAC do metal de base, exceder a valores limites especificados por normas (MODENESI, 2005 e BRANDI, 2008).

A taxa de transferência e o tempo que cada gotícula está em contato com a camada de escória afetam muito a composição química e as características metalúrgicas da poça de

fusão. Em operação estável, o metal de adição é transferido à poça de fusão de modo globular e que, apesar da diminuição do tamanho das gotículas com tensão crescente, a corrente de soldagem não exerce efeito significativo sobre o tamanho das gotículas e, por outro lado, o tempo em que uma gotícula está em contato com a escória aumenta com a tensão, tendo em vista que a ponta da gotícula se encontra mais longe da poça de fusão e, sendo assim, a extensão da interação entre uma gotícula metálica e a camada de escória determina a composição química da poça de soldagem (MODENESI, 2005, BRANDI, 2008 e MADALENA, 2013).

Neste processo de soldagem a solidificação se inicia na linha de fusão, superfícies adjacentes às sapatas de retenção, e progride para o centro da solda, por ser contínuo, a solidificação progride do fundo para o topo da solda (MADALENA, 2013).

Os ângulos nos quais os grãos colunares se encontram no centro da solda, dependem da forma da poça de fusão e o fator de forma é definido como a relação entre a largura (W) e a profundidade máxima (h) da poça de fusão. Portanto, soldas com alto fator de forma ($>2,0$) terão grãos com ângulo agudo na linha do centro, enquanto que soldas com baixo fator de forma ($<2,0$) se solidificarão com os grãos em ângulo obtuso. Como baixos fatores de forma são altamente indesejáveis, pois possibilita a acumulação de elementos residuais no centro da solda, correntes de soldagem elevadas devem ser evitadas, pois são causadoras deste fenômeno. Outro fator que controla a morfologia da poça de fusão é a condutividade do fluxo de soldagem, pois se sabe que a maior parte da energia elétrica é convertida em energia térmica dentro de uma camada de escória contígua à ponta do eletrodo, a qual atua como a fonte de calor neste processo. Sendo assim, os fluxos de condutividade elevada geram menos calor e resultam em menor penetração do metal base e poças de fusão menos profundas (MADALENA, 2013).

Apesar de campos magnéticos não serem aplicados neste processo de soldagem, alguma utilização destes é aplicada, a fim de promover o percurso do fluido e empurrar a camada de escória fundida para fora da região mais quente, a fim de eliminar mordeduras. Entretanto, o efeito de agitação magnética que induz o movimento de convecção ao fluido na poça de fusão faz romper a solidificação e o crescimento das dendritas colunares, conforme demonstrado na Figura 11 (MADALENA, 2013).

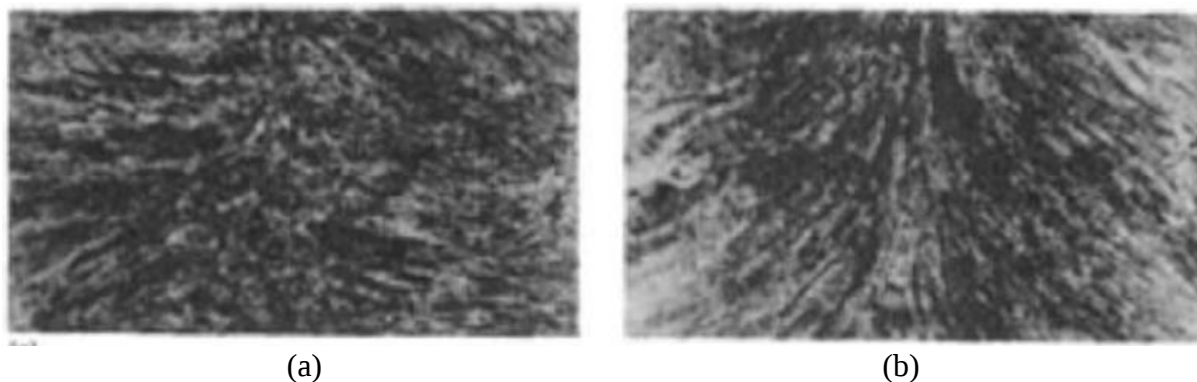


Figura 11 - Macrografia apresentando o efeito imposto por campos magnéticos sobre a soldagem por ESW. a) sem campo magnético; b) com campo magnético (PATEL, 2013).

Pode-se afirmar que vibração mecânica em poças de fusão neste processo, geralmente não provoca qualquer modificação microestrutural significativa, apesar de algum refinamento dos grãos terem ocorrido na interface entre a escória e o metal fundido.

Outras técnicas para refinar as microestruturas do metal de solda incluem a cavitação ultrassônica e a utilização de inoculadores químicos (MODENESI, 2005, BRANDI, 2008 e MADALENA, 2013).

2.10. Revestimento de aço carbono com aços inoxidáveis

O corpo-de-prova objeto de estudo desta pesquisa é composto por material de base em aço carbono, que recebeu revestimento em aço inoxidável austenítico AISI 316L, aplicado pelo processo de soldagem (cladeamento) por eletroescória. O termo cladeamento normalmente denota a aplicação de uma camada relativamente espessa ($\geq 3,0\text{mm}$) de metal de solda, com o objetivo de proporcionar resistência à corrosão para a superfície. Tipicamente, o cladeamento é aplicado a superfícies internas de aço carbono e aço liga de componentes de vasos de pressão, reatores de ureia, reatores nucleares e de hidrocraqueamento catalítico. Os materiais de revestimento mais usados são o aço inoxidável austenítico ou aços liga com alto teor de Níquel. Os processos de soldagem mais usados são a arco submerso, arame tubular e eletroescória (ASM, 1994).

A aplicação de revestimento por cladeamento é uma excelente maneira de conferir propriedades que não são características de uma superfície de um metal ou conservar um material de alto custo ou difícil de obter usando apenas uma fina camada de um material de menor custo ou mais abundante (ASM, 1994).

Tendo em vista as possíveis aplicações da soldagem de revestimento apresentadas anteriormente, é possível concluir que o desenvolvimento deste trabalho está relacionado à criação de superfícies com características especiais. A soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis é definida por PALANI E MURUGAN (2006a, 2007) como a deposição de uma camada de aço inoxidável sobre superfícies de aços carbono ou aços de baixa liga com o objetivo de obter revestimentos com propriedades de anti-corrosão. Em adição, o aço carbono tem propriedades mecânicas melhores que o aço inoxidável, e a união destes dois materiais proporcionam economia na fabricação de equipamentos, tornando os mais leves e com vida útil mais longa. Além disso, o emprego de um procedimento de soldagem contribui para que os revestimentos sejam depositados com rapidez e economia de material.

O planejamento para aplicação do revestimento por soldagem deve considerar limitações e problemas inerentes ao processo. A espessura da superfície requerida deve ser menor que a espessura máxima que pode ser obtida para o revestimento com o processo e material de deposição selecionado. Outro ponto importante é a posição de soldagem, visto que certos processos possuem limitações quanto a este quesito (por exemplo, o processo a arco submerso somente pode ser usado na posição plana horizontal). Em adição, quando é usado um processo de alta taxa de deposição de solda, que produz uma grande poça de fusão, a soldagem na posição vertical torna-se de grande dificuldade, sendo até impossível em certos casos. Algumas ligas têm processo de solidificação eutética, que formam grandes poças de fusão que se solidificam instantaneamente, sem transição para fase líquida. Tais materiais só podem ser soldados em posição plana horizontal (ASM, 1994).

A combinação entre a composição química ideal, com uma alta taxa de deposição em um número mínimo de camadas determina o grau de economia do processo de revestimento por soldagem. O fabricante seleciona o consumível de soldagem e o processo, enquanto que o comprador especifica a composição química e espessura do material de revestimento (ASM, 1994).

Quanto às propriedades dos revestimentos de aços inoxidáveis, as características desejadas do material depositado, segundo KANNAN E MURUGAN (2006), se resumem a uma resistência razoável, boa soldabilidade com o metal base e boas propriedades de resistência à corrosão geral e à corrosão localizada. Para FERRIERE et al. (2006), os revestimentos de aços inoxidáveis sobre aços carbono se mostram como uma boa solução para os problemas de elaboração de materiais que combinem altos níveis de propriedades mecânicas com boa resistência à corrosão.

Conforme mencionado anteriormente, um dos principais desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado do procedimento de soldagem para que o cordão seja depositado com a geometria desejada. Além disso, para o caso de revestimentos de aços carbono com aços inoxidáveis, verifica-se que as propriedades e a qualidade final dos revestimentos são fortemente influenciadas pela taxa de diluição. Na medida em que este processo se propõe à união de materiais com composições químicas diferentes, a mistura dos elementos presentes no aço carbono com os elementos do aço inoxidável pode comprometer as propriedades finais de anti-corrosão, o que inviabiliza esta operação (GOMES, 2010).

2.10.1. Controle da taxa de diluição

A diluição é definida como a relação entre a área de penetração e a área total da seção transversal do cordão de solda:

$$\% \text{ diluição} = \frac{x}{x + y} \times 100$$

Equação 1 - Cálculo da taxa de diluição (ASM, 1994).

Onde x é a quantidade de metal de base fundido, e y é a quantidade de metal de adição depositado (ASM, 1994).

Nos processos de fusão, a zona fundida pode ser formada sob as mais diversas condições. Nos processos mais comuns, isto é, na soldagem a arco com eletrodo consumível, o metal de adição fundido é transferido para a poça de fusão na forma de gotas, aquecidas a temperaturas muito elevadas, acima de 2000°C, no caso de aços (MARQUES, 1991).

Nas partes mais quentes da poça de fusão, localizadas logo abaixo do arco, o metal de adição é misturado, sob intensa agitação, ao metal de base fundido. Na parte superior da poça, a temperatura cai e ocorre a solidificação. Nas regiões superaquecidas ocorre uma intensa interação do metal fundido com os gases e escórias presentes na região do arco. Essas interações envolvem a absorção de gases (por exemplo, o hidrogênio pelo aço, alumínio ou cobre), a redução de óxidos, com a transferência de oxigênio para o metal, a transferência de elementos de liga e impurezas do metal fundido para a escória ou vice-versa e a volatilização de elementos com maior pressão de vapor (por exemplo, Zn, Cd, Cr e Al) (MARQUES, 1991).

A composição química final da zona fundida depende da intensidade destas interações, das composições químicas do metal de base e de adição e da participação relativa destes na formação da zona fundida. Esta participação relativa é conhecida como “coeficiente de diluição” ou simplesmente, como “diluição”. A diluição pode ser medida em macrografia da seção transversal de soldas, como mostra a figura (12) e (13). Seu valor pode variar entre 100% (soldas sem metal de adição) e 0% (brasagem) (MARQUES, 1991).

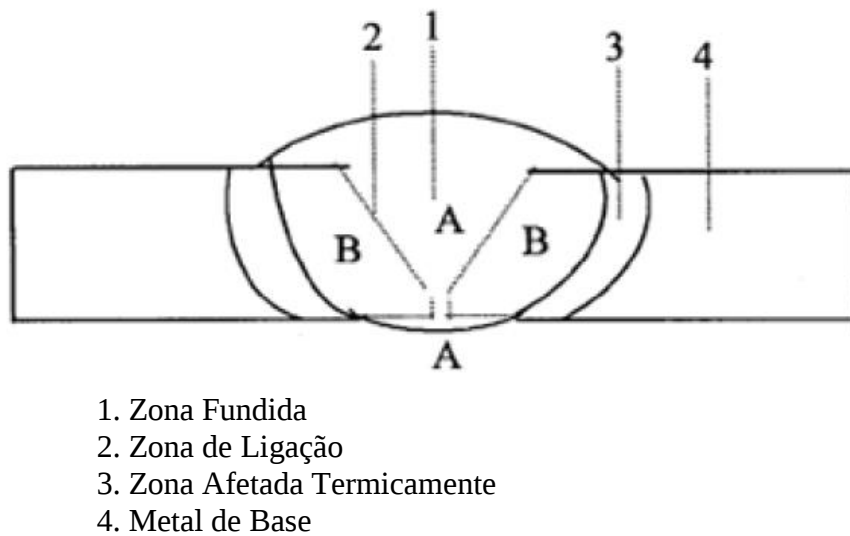


Figura 12 - Diluição medida na seção transversal de uma solda (MARQUES, 1991).

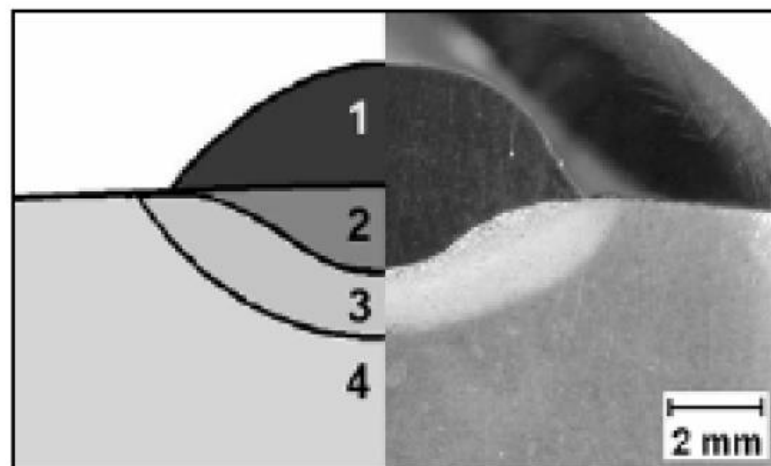
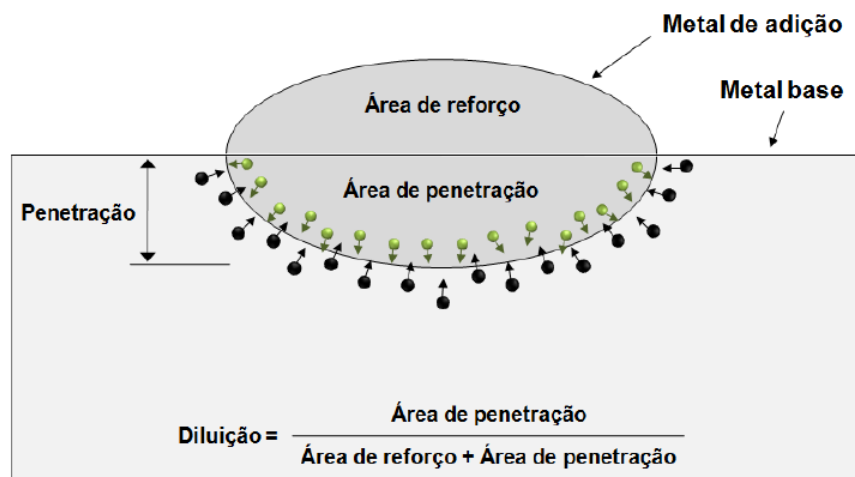
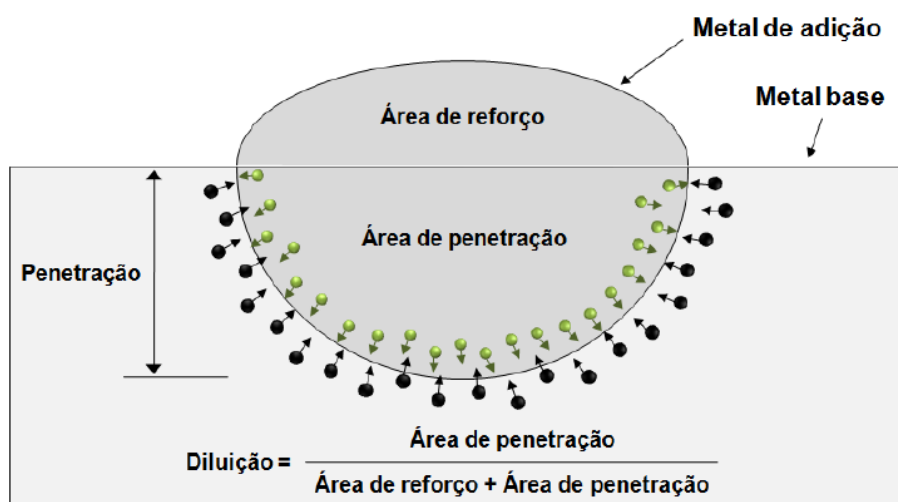


Figura 13 - Macrografia de uma solda de revestimento (BOHÓRQUEZ et al., 2010).

O aumento da penetração provoca o aumento da área de penetração e esta, consequentemente, aumenta o nível de diluição. No caso da união de materiais diferentes, o aumento da diluição faz com que exista uma maior difusão entre os elementos presentes na composição química dos respectivos materiais. A Figura 13 ilustra a afirmação anterior, indicando que a união de materiais com composições químicas diferentes tende a difundir os elementos entre o metal base e do metal de adição, o que pode resultar na formação de novos compostos (Figura 14a). Dessa forma, o aumento da penetração e, consequentemente, da diluição, faz com que a região de contato entre os materiais também aumente, resultando em uma maior difusão entre os seus elementos (Figura 14b) (GOMES, 2010).



(a)



(b)

Figura 14 - Aumento da difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição em função do aumento do nível de diluição (GOMES, 2010).

Quando se trata do revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis, o aumento da interação entre os materiais se mostra como um fator prejudicial aos resultados do processo, já que compromete as propriedades finais de resistência à corrosão. Isto explica porque diversos pesquisadores apresentam o controle da diluição como um dos fatores de maior importância para a qualidade final dos revestimentos de aços inoxidáveis (MURUGAN e PARMAR, 1997b; GHOSH et al., 1998; PALANI e MURUGAN, 2007; SHAHI e PANDEY, 2008b; BALASUBRAMANIAN et al., 2009a).

O fabricante de chapas e equipamentos revestidos por soldagem com aço inoxidável deve entender como a diluição entre o metal de revestimento e o metal de base afeta a composição e o balanço metalúrgico. Deve também conhecer as taxas de ferrita, de forma a minimizar o aparecimento de fissuras durante a solidificação do material e ainda garantir a ausência de martensita na interface de soldagem e baixo nível de carbono, de forma a preservar a integridade e manter as características de resistência à corrosão (ASM, 1994).

A previsão das microestruturas e propriedades para os aços inoxidáveis austeníticos tem sido tópico de diversos estudos. Durante as duas últimas décadas, quatro diagramas de previsão de microestruturas têm sido muito aplicados. Estes incluem o diagrama de Schaeffler, diagrama de DeLong, e os do Conselho de Pesquisa em Soldagem (*Welding Research Council – WRC*), WRC-1988 e WRC-1992 (ASM, 1994).

Embora cada processo de soldagem de revestimento tenha uma determinada taxa de diluição, algumas variações nos parâmetros de soldagem podem minimizar as consequências desse fenômeno. Taxas entre 10 e 15% em geral são considerados ótimos. Valores abaixo de 10% levantam dúvidas sobre a integridade da solda, e acima de 15% aumentam o custo do metal de revestimento. Infelizmente, a maioria dos processos de soldagem apresentam altas taxas de diluição (ASM, 1994).

Para PALANI et al. (2006), o nível de diluição depende da diferença entre as composições químicas do metal base e metal de adição, da diluição inerente ao processo de soldagem utilizado e da técnica de soldagem. Além disso, independentemente do processo de soldagem escolhido, as variações na diluição são fortemente influenciadas pelas variáveis do processo, tais como corrente, tensão e velocidade de soldagem.

KISER apud IRVING (1992), diz em seu trabalho que os processos contribuem para a diluição, com a influência de muitas variáveis incluindo a técnica de operação e ao arco elétrico, no processo eletrodo revestido, por exemplo, a diluição pode variar de 10% a 30%. O processo MIG-MAG, aparece contribuindo com a mesma diluição. Já o processo TIG pode

ser o menor de todos, com 2%, mas também pode alcançar um máximo de 40% em alguns casos. O processo a arco-submerso situa-se entre 20 a 40%.

Devido a importância da diluição para a soldagem de revestimento, cada parâmetro de soldagem deve ser cuidadosamente avaliado, no entanto, muitos desses parâmetros que afetam a diluição em aplicação de soldagem de revestimento não são bem controlados. São eles:

- Amperagem: O aumento da amperagem (densidade de corrente) provoca aumento da diluição. O arco torna-se mais quente e penetra com maior profundidade, levando a maior fusão do metal de base.
- Polaridade: Correntes contínuas com eletrodo no polo negativo (DCEN) provocam menor penetração, resultando em menor diluição do que correntes contínuas com eletrodo no polo positivo (DCEP). O uso de corrente alternada produz melhores resultados, com valores para penetração situados entre os fornecidos pelo DCEN e o DCEP.
- Diâmetro ou bitola do Eletrodo: Quanto menor a bitola do eletrodo, menor a intensidade de corrente, o que resulta em menor diluição.
- Comprimento do Eletrodo: O uso de eletrodos de maior comprimento diminui a diluição, ao passo que eletrodos mais curtos aumentam esta taxa.
- Velocidade de deslocamento: Menores taxas de velocidade de deslocamento do arco elétrico reduzem a quantidade de metal de base fundido, a proporção que aumentam a quantidade de metal de revestimento derretido, diminuindo a diluição.
- Oscilação: grandes oscilações do eletrodo reduzem a ocorrência da diluição. A frequência de oscilação também afeta a diluição, pois quanto maior a frequência de oscilação, menor a diluição.
- Posição de soldagem: dependendo da posição de soldagem ou da inclinação de trabalho, a gravidade pode fazer com que a poça de metal fundido escorra para frente ou para trás, ou ainda permaneça sob o arco. Se a poça de fusão permanecer a frente ou sob o arco, menor será a penetração no metal de base e também menor será a diluição. Se a poça de fusão estiver muito a frente do arco, a fusão superficial do metal de base não será suficiente para que a soldagem ocorra.
- Proteção do arco: O meio de proteção do arco, seja por gás ou fluxo, também afeta a diluição. São vários os meios de proteção do arco, que podem ser listados em ordem decrescente de diluição conforme a seguir: fluxos granulares sem adição de gás, gás

hélio, dióxido de carbono, argônio, soldagem a arco com núcleo protegido por fluxo, e fluxo granular contendo ligas.

- Metal de revestimento adicional: A adição extra de metais (não incluindo o eletrodo) à poça de fusão na forma de pó, arame, fita ou fluxo, promove redução da diluição pelo aumento da quantidade total de metal de revestimento e pela menor quantidade de metal de base que é derretido. Para o revestimento de solda nas superfícies internas de grandes vasos de pressão, grãos maiores, produzidos pela oscilação de sistemas de soldagem por múltiplos arames ou por eletrodos em fita melhoram a produtividade e minimizam a diluição, oferecendo uma superfície uniformemente lisa (ASM, 1994).

Na soldagem de revestimento de aço inox, o mais importante é a composição final do metal de solda e suas propriedades. Esta composição não depende só da composição do metal de base e do metal de adição, mas também, e principalmente, da diluição deles. Normalmente a composição do metal de solda não é uniforme, particularmente em soldagem de revestimento, onde a composição do metal de adição é diferente e o grau de mudança da composição do metal de solda em função da diluição é praticamente o mesmo em toda superfície revestida. As características de solidificação do metal de solda, também são influenciadas pela diluição relativa e pelo grau de mudança da composição próximo ao metal base. A utilização de um metal de adição específico deverá prever, segundo Schaeffler, se sua composição não favorecerá trincas a quente na solidificação do metal depositado, assegurando que esta trinca não ocorrerá durante a fabricação ou em serviço. O conceito básico de formação de ligas, as características metalúrgicas da liga resultante, e as propriedades mecânicas e físicas devem ser consideradas quando se projeta um revestimento de aço carbono com aço inoxidável. (SUN et al, 1994).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Neste trabalho foram utilizados os seguintes materiais, conforme descritos e detalhados nos itens abaixo.

3.1.1. Metal de base

Como metal de base para a confecção dos corpos-de-prova foram utilizadas duas amostras de chapa de aço carbono ASTM A 516-06-70 de 25 mm de espessura, cortadas com dimensões de 200 mm de largura e 500 mm de comprimento cada, que posteriormente foram unidas por solda de topo. A Tabela abaixo apresenta a composição química do metal de base, conforme certificado de inspeção do fabricante (USIMINAS – Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.):

Tabela 5 - Composição química do metal de base

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	V	Ti
% (Peso)	0,2200	0,1800	0,9900	0,0180	0,0080	0,0390	0,0200	0,0030	0,0020	0,0020
Elemento	Cr	Ni	Mo	Sn	N	As	B	Ca	Sb	
% (Peso)	0,0300	0,0200	0,0000	0,0020	0,0055	0,0020	0,0002	0,0003	0,0000	

3.1.2. Materiais de adição

Como materiais de adição foram utilizados os consumíveis de soldagem, conforme características descritas abaixo:

- Arame sólido para soldagem a arco submerso (SAW), de diâmetro nominal 3,97mm, conforme norma AWS A5.17-97 EM12K ASME SFA 5.17 ED07 AD08 EM12K, fornecido pela empresa Belgo Bekaert Arames.
- Fluxo aglomerado para soldagem a arco submerso (SAW) conforme norma AWS A5.17 ASMEII PART C SFA 5.17, fornecido pela CARBOOX.
- Fita para soldagem por eletroescória (ESW) conforme norma EN ISO 14343-A ZB 21 13 3 L, de dimensões 0,5 x 30 mm, fornecida pela empresa Bohler.
- Fluxo para soldagem por eletroescória (ESW) conforme norma EN 760 (E) SA FB 2, fornecido pela empresa Bohler.

A tabela a seguir mostra as composições químicas de cada material de adição de acordo com os certificados de qualidade emitidos pelos fornecedores:

Tabela 6 - Composição química dos consumíveis conforme certificados de qualidade dos fornecedores (% em peso).

CONSUMÍVEL	C	Al	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	Co	N
Arame sólido para soldagem a arco submerso (SAW)	0,0720	0,0018	0,2670	1,1590	0,0176	0,0194	0,0227						
Fluxo aglomerado para soldagem a arco submerso (SAW)	0,1100		0,2300	1,2500	0,0130	0,0090	0,0130						
Fita para soldagem por eletroescória (ESW)	0,0120		0,2500	1,7500	0,0120	0,0030	0,1000	14,1000	20,3000	2,9000	0,0200	0,0500	0,0350
Fluxo para soldagem por eletroescória (ESW)	0,0250		0,3500	1,3000	0,0120	0,0030		12,6000	18,2000	2,6000	0,0200		

3.2. Procedimento de Soldagem

Com o objetivo de qualificar o procedimento de soldagem e sempre seguindo as determinações da norma ASME, foram realizados dois processos de soldagem distintos: primeiramente foi realizada soldagem a arco submerso (SAW) para união entre as amostras de chapa do metal de base. Em seguida foi realizado um processo de soldagem por eletroescória por fita, com uma camada depositada, onde foram utilizados os consumíveis conforme listado na Tabela 6. Tanto a soldagem para união quanto a soldagem para deposição dos revestimentos sobre os substratos foram realizadas na posição plana de soldagem 1G, de acordo com a norma ASME IX.

O procedimento de soldagem inicial consiste na união das duas amostras de chapa pelo processo a arco submerso. A primeira etapa na preparação das peças a soldar é a limpeza, onde as peças devem estar limpas e livres de qualquer outro material que não seja sua própria superfície, tais como tintas, vernizes, óleos, graxas, gorduras em geral ou outros materiais que possam contaminar a poça de fusão.

Concluída esta etapa, passa-se para o próximo passo da preparação, que consiste em executar um chanfro, dar espaçamento e fixar as peças a serem soldadas. É importante destacar que este segundo passo vai depender muito da espessura da peça a ser soldada.

Em espessuras superiores a 15 mm recomenda-se a utilização de chanfro duplo; a solda deve ser feita pelos dois lados. Quando possível, recomenda-se que esta solda seja feita com dois maçaricos de mesma capacidade e trabalhando em conjunto, um de cada lado, principalmente em espessuras acima de 20 mm, como é o caso. A figura a seguir representa o chanfro preparado para o processo, e que está de acordo com a norma ASME, seção IX, parágrafo QW-402.

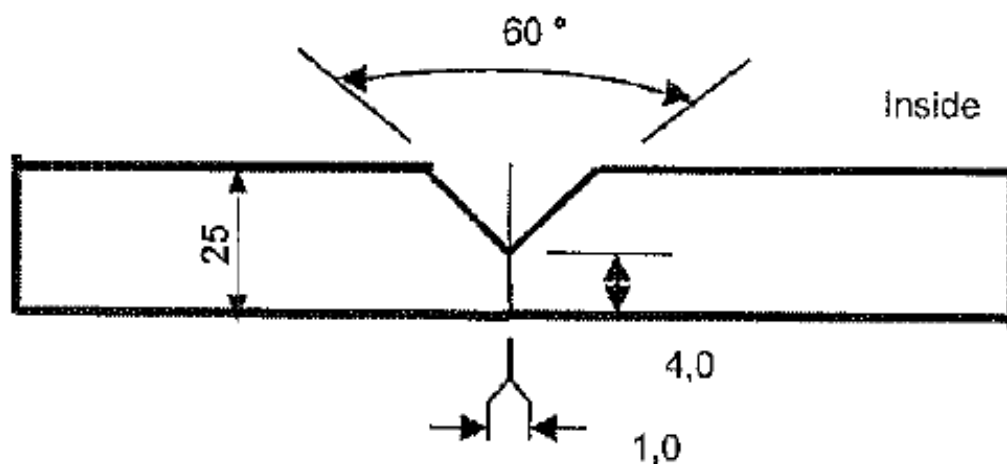


Figura 15 - Detalhe da junta (QW-402).

Em muitos casos, a etapa seguinte de preparação é o pré-aquecimento das chapas, que é executado não só para facilitar o processo de fusão da solda e do material a soldar, mas também para compensar a contração e as possíveis deformações e trincas do cordão.

A temperatura de pré-aquecimento para soldagem depende de vários fatores, em especial a composição química, a espessura da chapa, o aporte de calor e os consumíveis empregados, e pode ainda ser estimada sem a necessidade de realização de ensaios, através de procedimento descrito na norma BS 5135:1984 – *Process of arc welding of carbon and carbon manganese steels*, e de tabelas que fornecem a temperatura de pré-aquecimento para a soldagem de aços para caldeiras e vasos de pressão, em função de sua espessura e carbono equivalente (CE).

A equação abaixo é dada pelo IIW (*International Institute of Welding*), e é amplamente usada para o cálculo do carbono equivalente:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Equação 2 - Cálculo do carbono equivalente.

Tendo como parâmetros os dados da composição química do metal de base, fornecidos em certificado por seu fabricante, e apresentados na tabela 5 deste trabalho, chegou-se a um valor para o carbono equivalente de 0,40% em relação ao peso do material.

A tabela a seguir representa a temperatura de pré-aquecimento considerando um aporte de calor de 1,4 kJ/mm e o emprego de consumíveis com teor de hidrogênio difusível da ordem de 5 a 10 ml/100 g de metal depositado:

Tabela 7 - Temperatura de pré-aquecimento considerando aporte de 1,4 kJ/mm (USIMINAS, 2016).

Espessura da chapa (mm)	Temperatura de pré-aquecimento para a soldagem (°C) (b)										
	CE (a)	0,35	0,38	0,41	0,43	0,45	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57
10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	75
15,0	-	-	-	-	-	-	-	40	70	90	100
20,0	-	-	-	-	-	-	-	100	120	130	140
25,0	-	-	-	-	-	70	90	120	140	150	160
30,0	-	-	-	-	50	90	110	140	160	165	175
37,5	-	-	-	50	90	110	130	160	175	180	185
50,0 ~ 100,0	-	50	75	100	115	125	140	170	190	200	200

Para o cálculo do aporte de calor, também conhecido como *Heat Input*, foi usada a equação abaixo:

$$AC \text{ (kJ/mm)} = V.A.60/v.1000$$

Equação 3 - Equação para cálculo do aporte térmico.

A tabela a seguir apresenta a sequência de soldagem para união, pelo processo SAW, e para revestimento, pelo processo ESW:

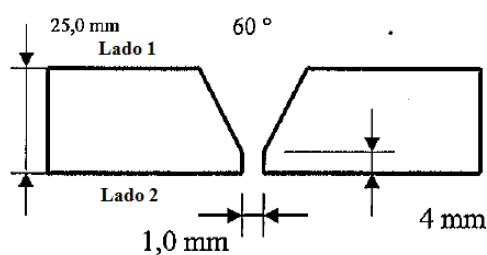
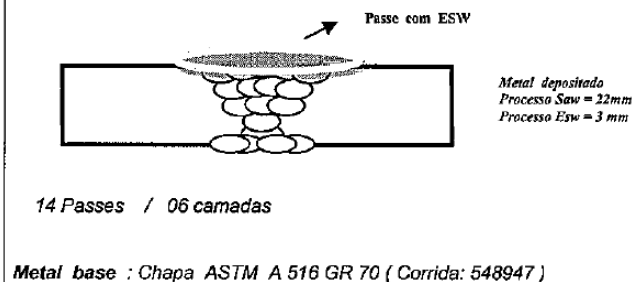
Tabela 8 - Sequência de soldagem SAW.

SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM		CORRENTE			TENSÃO (V)	POSIÇÃO DE SOLDAGEM
		(A)	TIPO	Pol		
1	LADO 1	480~650	CC	(+)	28~32	1G
GOIVAGEM + ESMERILHAMENTO + LÍQUIDO PENETRANTE						
2	LADO 2	480~650	CC	(+)	28~32	1G
3	LADO 1	700	CC	(+)	25	1G

A velocidade de soldagem para o processo SAW fica entre 450 mm/min e 550 mm/min, com isso, utilizando os valores máximos para os dados informados, o valor do aporte de calor é de 2,27 KJ/mm, ou seja, acima do valor considerado na tabela 7, e quanto maior o aporte de calor empregado, menor a temperatura de pré-aquecimento necessária. Esta tabela indica que, para uma espessura de 25mm, o pré-aquecimento é dispensável, portanto, esta etapa não foi executada durante a soldagem a arco.

Se por um lado não é necessário o pré-aquecimento, por outro, a temperatura entre passes deve ser controlada e limitada a 150°C, a fim de evitar riscos de ocorrência de fissuração a quente.

Após a preparação, as peças já estão prontas para o início da soldagem. Com o chanfro na posição 1G (plana), a soldagem é iniciada pelo lado 1, com o processo a arco submerso. A figura a seguir apresenta croqui com as dimensões da junta e a sequência de passes:

CROQUI DA JUNTA :**SEQUÊNCIA DE PASSES :****Figura 16** - Croqui e sequência de passes de soldagem.

Ao todo foram realizados 13 passes pelo processo SAW e um único passe pelo processo ESW. A previsão era de deposição de 22mm pelo processo a arco submerso e 3mm para a camada de revestimento pelo processo por eletroescória, totalizando os 25mm da espessura do metal de base. Toda a sequência foi registrada no relatório de acompanhamento de

qualificação de procedimento de soldagem, e a tabela como os parâmetros de cada passe é reproduzida a seguir:

Tabela 9 - Sequência de soldagem.

SEQUENCIA DE SOLDAGEM													
PASSOS	CAMADA	PROCESSO	CLASSIF.	DIÂMETRO	Corrente		Tensão (V)	Velocidade de Avanço (Cm/min)	POSICÃO DE SOLDAGEM	TEMPERATURA		ENERGIA (KJ/cm)	CORRIDA
					Tipo e pol.	AMPER. (A)				PA	EP		
1	1	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	550	29	47	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
2	2	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	530	29	45	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
3	3	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	560	31	50	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
4	3	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	560	31	50	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
5	3	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	600	32	50	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
6	4	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	560	31	50	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
7	4	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	620	32	55	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
8	4	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	570	30	52	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
9	4	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	580	30	51	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
Goivagem + Esmerilhamento													
10	5	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	590	31	52	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
11	5	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	580	30	52	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
12	5	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	580	30	53	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
13	5	SAW	F7A4/EM12K	3,97	CC +	570	29	52	1G	> 25°C	< 150°C	NA	5240901 / 031396
14	6	ESW	SOUPOKAY SOUTOTARE 20131 L / SOUTOKAY RECORD 802.122	0,5 x 30	CC +	700	25	18	1G	> 25°C	< 150°C	NA	95725 / 7501638
VISUAL DE SOLDA								OBS.:					
CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO:		Norma ASME IX						Reforço de solda com 2,8 mm .					
CONDIÇÕES SUPERFICIAIS:		Livre de Defeitos											
LAUDO:		Aprovado											

Após a deposição da solda no lado 1, e antes da soldagem no lado 2, foi feita a goivagem com eletrodo de carvão e o esmerilhamento do cordão, para eliminar rebarbas, respingos e imperfeições do cordão. Os cordões de solda foram depositados de forma retilínea, com soldagem SAW feita com um único eletrodo com distância de 25 mm entre o bico e a peça. A limpeza entre passes foi feita por escovamento e esmerilhamento.

Segundo a norma ASME VIII Divisão 1, os vasos devem ser submetidos a tratamento térmico, com temperaturas e tempo de patamar determinados para cada tipo de material (P-number classifica os materiais com a mesma soldabilidade), dependendo da espessura. No caso de aço P-No 1 Gr 1 (Por ex.: SA-516):

- Para soldas acima de 38 mm;
- Para soldas acima de 32 mm até 38 mm, a menos que um preaquecimento de 95° C seja aplicado durante a soldagem.

Portanto, com chapas de espessura 25 mm, não foi necessário tratamento térmico pós-soldagem.

3.3. Exame visual de Solda

O ensaio visual foi realizado pelo método direto. Para o método direto o inspetor deve ter um acesso visual à superfície em exame para que a vista se localize a uma distância máxima de 600 mm, e a um ângulo de observação de, no mínimo, 30 graus em relação à superfície ensaiada, conforme figura 17.



Figura 17 - Campo de visão (ETMO, 2009).

Durante o ensaio visual, foi verificado se o metal de base está de acordo com o especificado. Além disso, foi ainda verificado se a preparação e limpeza da superfície estavam adequadas e se a intensidade luminosa na superfície a ser ensaiada era satisfatória.

Durante a soldagem foi feita a verificação das variáveis de soldagem estabelecidas nas instruções de execução e inspeção de soldagem, quanto a:

- Processos utilizados na raiz, enchimento e acabamento;
- Classificação e diâmetro do consumível;
- Faixas de espessura e diâmetro qualificadas;
- Posição e progressão da soldagem;
- Polaridade, corrente e tensão;
- Vazão de gás (quando aplicável);
- Temperatura Interpasse (quando aplicável);

- Pós Aquecimento (quando aplicável).

A inspeção visual e dimensional da junta soldada foi realizada observando a existência de descontinuidades inaceitáveis e verificando as dimensões e tolerâncias estabelecidas nos documentos de referência, tais como:

- Abertura de arco;
- Trincas;
- Falta de fusão;
- Falta de penetração;
- Crateras;
- Ângulo excessivo de reforço;
- Concavidade;
- Concavidade excessiva;
- Embicamento;
- Mordedura;
- Mordedura na raiz;
- Penetração excessiva;
- Perfuração;
- Poro superficial;
- Rechupe de cratera;
- Reforço excessivo;
- Respingos;
- Sobreposição;
- Solda em ângulo assimétrico;
- Deformação angular;
- Deposição insuficiente.

3.4. Ensaio por Líquido Penetrante

O ensaio por líquidos penetrantes presta-se a detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, etc., podendo ser aplicado em

todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira (ANDREUCCI, 2013).

O método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície (ANDREUCCI, 2013).

O procedimento de ensaio foi baseado no código ASME Seção V, artigo 6, e seguiu as etapas básicas conforme descrito a seguir:

- a) Preparação de superfície: A primeira etapa foi a verificação das condições superficiais da peça, que deve estar isenta de resíduos, sujeiras, óleo, graxa e qualquer outro contaminante que possa obstruir as aberturas a serem detectadas.
- b) Limpeza da superfície: O sucesso do método depende dos defeitos estarem abertos à superfície, portanto, todo produto de corrosão, escória, pinturas, óleo e graxa foram removidos da superfície com o auxílio de solvente.
- c) Temperatura da superfície e do líquido penetrante: tanto a temperatura da peça quanto a do líquido foram mantidas a 20°C durante o ensaio. Temperaturas mais altas podem acelerar o processo de evaporação dos componentes voláteis do penetrante, prejudicando o processo.
- d) Aplicação do penetrante: O penetrante foi aplicado por pincelamento, evitando dispersão de material no ambiente. Foi utilizado penetrante VP 30, que é um tipo visível e lavável em água.
- e) Tempo de penetração: foi obedecido tempo de penetração conforme código ASME VIII Div. 1, com tempo de 15 minutos.
- f) Remoção do excesso de penetrante: após a penetração, o penetrante foi removido com água.
- g) Revelação: para revelação foi aplicado, por *spray*, o revelador D 70, e aguardados 20 minutos para a revelação.
- h) Secagem: após aplicação do revelador, foram aguardados 60 minutos para secagem, antes da inspeção.
- i) Limpeza final: depois de completado o exame, foi executada uma limpeza final na peça, realizada com solvente.

3.5. Ensaaios Mecânicos

Para seleção dos corpos de prova e critérios de aprovação foi seguido o código ASME seção IX. Foram realizados ensaios mecânicos de tração, de dobramento e de dureza.

A figura a seguir demonstra o esquema de retirada de corpos de prova:

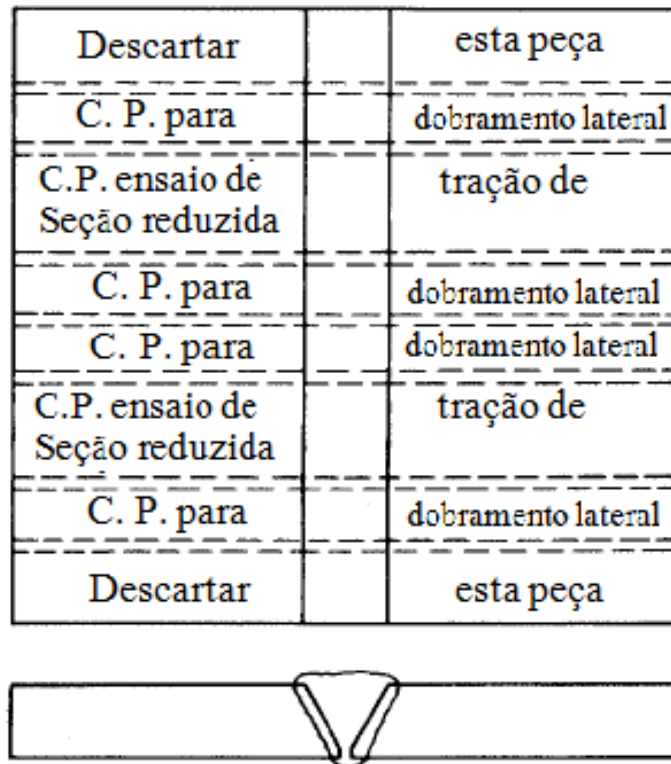


Figura 18 - Desenho esquemático para retirada de corpos de prova conforme padrão QW-463.1(b) (Adaptado de ASME, 2013).

3.5.1. Ensaio de tração

Foi realizado ensaio de tração de solda, para determinação do limite máximo de resistência e do tipo de fratura apresentado. Para realização do ensaio, foram seguidas as seguintes normas:

- Procedimento de ensaio: conforme ASTM – A 370;
- Norma e tipo do CP: ASME IX QW – 462.1 (a);
- Critério de aceitação: conforme ASME IX QW – 153.

A norma ASTM A-370 padroniza os ensaios mecânicos em materiais fabricados em aços carbono, inox, e aços liga, e define todos os parâmetros para realização dos testes, tais como a

carga, condições de operação do equipamento, velocidade de teste e parâmetros para o corpo-de-prova.

Os corpos de prova seguem especificação ASME IX, e são padronizados conforme a figura que se segue:

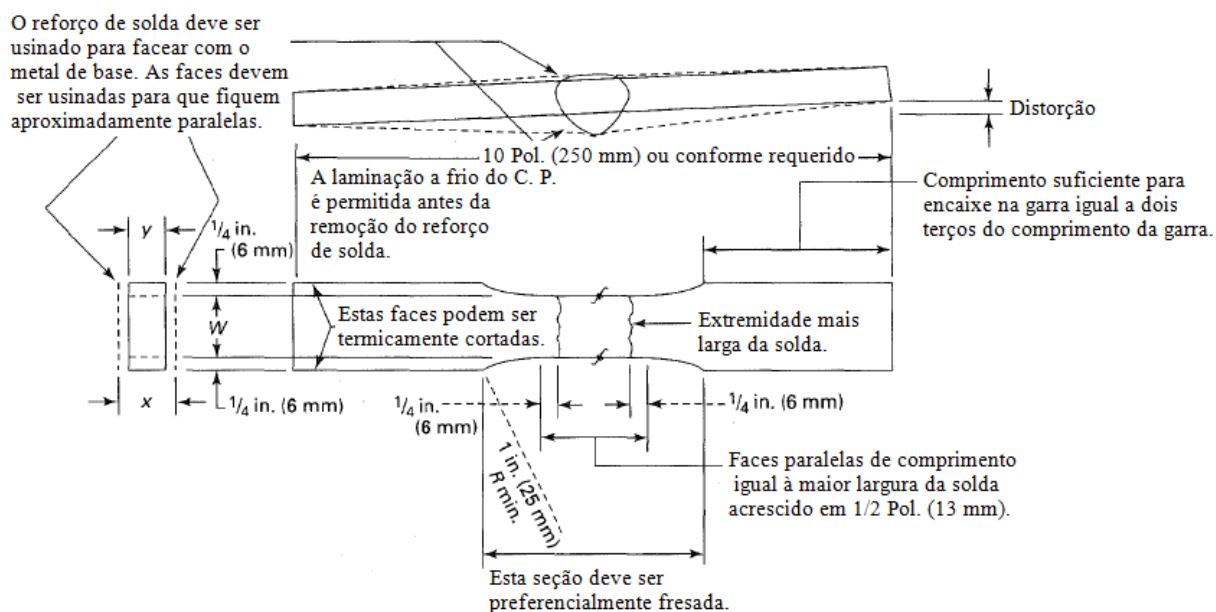


Figura 19 – Corpo-de-prova conforme ASME IX QW – 462.1 (a) (Adaptado de ASME, 2013).

O teste foi realizado com máquina de ensaio hidráulica universal, de faixa nominal 100Mp, fabricada pela VEB-WPM, modelo 1974, com escala de 0 a 40 Ton. A temperatura de ensaio era ambiente, e os corpos de prova tinham as seguintes dimensões:

Tabela 10 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.

Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)
1	18,70	25,10	469,37
2	18,80	25,10	471,88

3.5.2. Ensaio de dobramento

Foram realizados ensaios de dobramento nos corpos-de-prova confeccionados a partir das amostras constituídas de metal de base em aço carbono, revestido com as ligas em estudo, a fim de fornecer uma indicação qualitativa da ductilidade dos materiais citados.

Para realização do ensaio, foram seguidas as seguintes normas:

- Procedimento de ensaio: conforme ASTM – A 370;
- Norma e tipo do CP: ASME IX QW – 462.2;
- Critério de aceitação: conforme ASME IX QW – 163.

Foram preparados quatro corpos de prova, padronizados conforme figura a seguir:

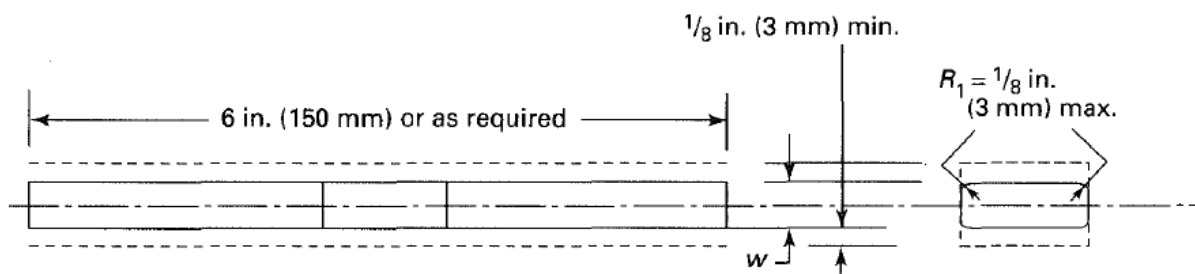


Figura 20 - Corpo-de-prova para ensaio de dobramento lateral conforme padrão ASME IX QW 462.2 (ASME, 2013).

Os corpos-de-prova utilizados na realização dos testes de dobramento possuem as seguintes dimensões:

Tabela 11 - Dimensões para os corpos-de-prova utilizados no ensaio de dobramento lateral.

Corpo de Prova	Dimensões (mm)		
	Largura	Espessura	Comprimento
3	9,3	25,1	150
4	9,3	25,2	150
5	9,4	25,1	150
6	9,4	25,2	150

O ensaio consistiu em dobrar os corpos-de-prova de eixo retilíneo e seção retangular, onde o mesmo é assentado em dois apoios afastados a uma distância específica, de acordo com o tamanho do corpo-de-prova, por intermédio de um cutelo, que aplica um esforço de flexão no centro do corpo-de-prova até que se atingiu o ângulo de dobramento especificado, conforme apresentado na Figura 21.

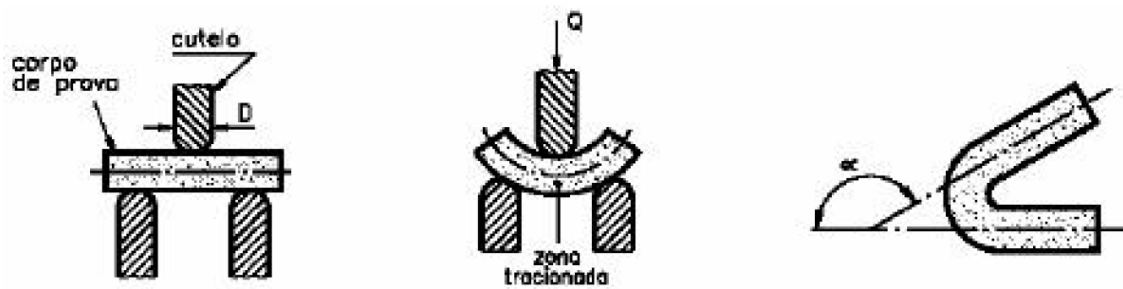


Figura 21 - Ensaio de dobramento guiado, com ângulo de 180° (ANTUNES, 2008).

Para realização do teste foi utilizada máquina de ensaio hidráulica universal, de faixa nominal 100Mp, fabricada pela VEB-WPM, modelo 1974, com as seguintes dimensões principais:

- Diâmetro do mandril: 38,00 mm;
- Diâmetro dos roletes: 50,0mm;
- Distância entre os roletes: 60,20 mm.

Os corpos-de-prova foram dispostos na posição transversal à solda.

3.5.3. Ensaio de dureza

Foram realizados ensaios de dureza Vicker, seguindo o procedimento de ensaio conforme norma ASTM E-92. Para medição de dureza na seção transversal, o corpo de prova deve ser de acordo com a ASTM E 340. O acabamento na seção transversal requer uma preparação mínima até a lixa grão 220, seguido da realização de ataque químico da junta para que seja revelada a região da ZAC. Os testes ocorreram a temperatura ambiente, usando uma carga de 10,0 Kgf, com tempo de carregamento de 10 a 15 segundos. Foi utilizado como referência para avaliação a norma PETROBRAS N-133 Revisão J e o valor requerido foi de ≤ 248 HV.

Os valores de dureza padrão foram obtidos do certificado de aferição (454 HV) e na verificação do aparelho antes do início do ensaio (453 HV).

Os ensaios foram realizados em 20 pontos ao longo da seção transversal do corpo-de-prova, dispostos em intervalos conforme figura a seguir:

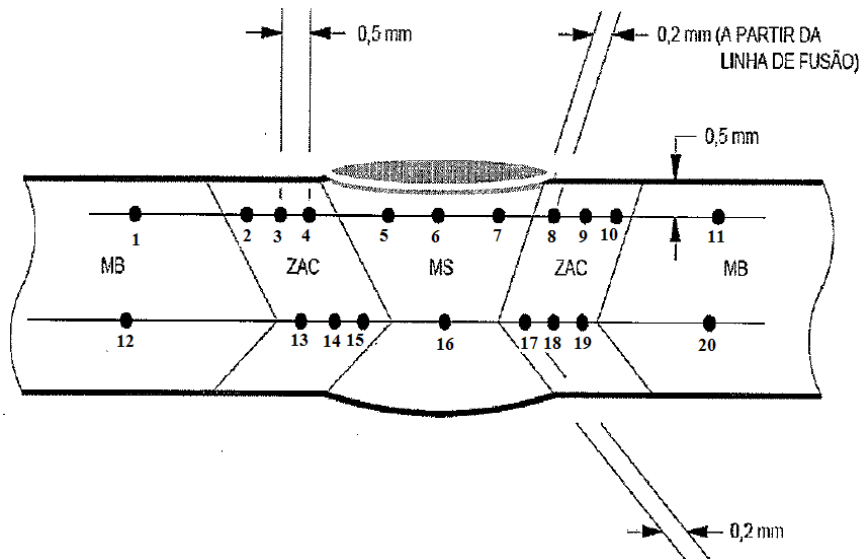


Figura 22 - Pontos de ensaio de dureza.

Os perfis de dureza foram levantados com equipamento modelo WPM-HPO 250, e o acabamento superficial do corpo-de-prova foi polido.

3.6. Exame macrográfico

O exame macrográfico foi realizado conforme norma ASME IX – QW 472.4, onde a superfície deve ser preparada por meio de lixamentos sucessivos, com lixas de granulação decrescente. Em seguida foi feita a lavagem da superfície em água corrente, com fricção de algodão. A secagem foi feita com álcool e jato de ar quente, evitando-se qualquer contato com a superfície preparada e seca.

Após a lavagem e secagem, a superfície passou por ataque químico por solução Nital 10% aplicado com algodão. Para qualificação de procedimento de soldagem, o código ASME, Seção IX exige que a macro-estrutura da seção transversal, compreendida pelo metal de solda e pela zona afetada pelo calor, esteja com fusão completa e livre de trincas. A revelação também identifica soldas, segregação, trincas, profundidade de temperatura, entre outras indicações lineares.

A figura a seguir reproduz a macrografia da região soldada e revestida:

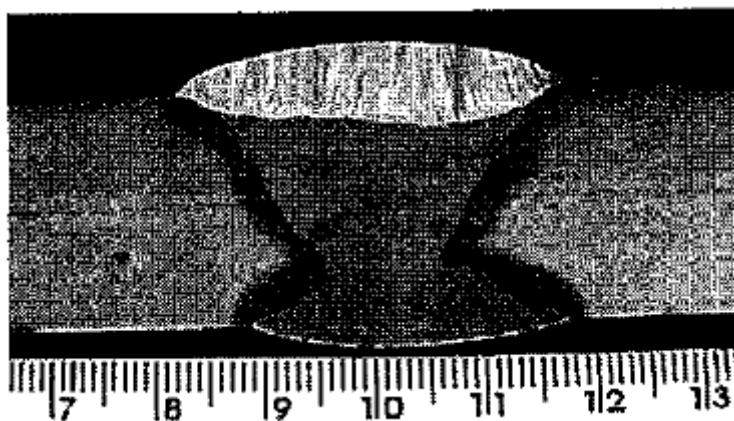


Figura 23 - Macrografia da região soldada e revestida.

O padrão do código ASME IX utilizado como critério de avaliação foi o QW 184 e foi utilizada lupa com aumento 10X para verificação do registro de ensaio.

3.7. Ensaio Metalográfico

O ensaio metalográfico procura relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções e outros, e pode ser do tipo macrográfico ou micrográfico, sendo que somente o segundo foi utilizado neste trabalho.

Através do exame de micrografia ótica foi realizado o estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde foi possível observar as fases presentes e identificar o tamanho de grão do material, o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

O ensaio foi realizado no Laboratório Metalúrgico da DM CJ Inspeções, e a preparação do corpo-de-prova passou pelo corte, com equipamento policorte, lixamento com lixas com grãos abrasivos fabricados em óxido de alumínio, seguido de limpeza da superfície com álcool etílico. A limpeza precedeu o polimento, que visava um acabamento superficial polido isento de marcas. O polimento foi com pasta de diamante 3; 2,5 e 1 micron, utilizando álcool etílico como lubrificante. O ataque utilizado é denominado de Murakami (10g de ferricianeto de potássio + 10g de hidróxido de sódio em 100 ml de água) a mistura é aquecida a 95°C e a imersão é efetuada durante 5 segundos, este reagente tem o efeito de revelar e colorir simultaneamente.

3.8. Análise química

A análise química foi realizada com amostra sólida revestida com a liga em estudo, no espectrômetro de emissão ótica, marca Spectro, modelo Spectrolab, localizado no Laboratório Metalúrgico da DMCJ Inspeções, com objetivo de determinar os teores dos principais elementos de liga presentes nos revestimentos depositados.

A análise foi realizada conforme Norma ASTM E1086, com temperatura de 21,6°C e umidade relativa de 56%. O processo consiste em uma descarga controlada que é produzida entre a superfície plana do corpo-de-prova e o eletrodo de contagem. A energia radiante das linhas selecionadas para análise é convertida em energia elétrica por tubos fotomultiplicadores e armazenada em capacitores. A carga é retirada após atingir um determinado nível de energia radiante acumulada, ou após o fim de um período de tempo. Após o fim do período de exposição, a carga em cada capacitor é medida e gravada conforme relativa energia de concentração.

O ensaio foi realizado na cota de 2mm a partir da linha de fusão, conforme mostrado esquematicamente na figura a seguir, a fim de conferir as propriedades de resistência à corrosão e a diluição dos revestimentos em questão.

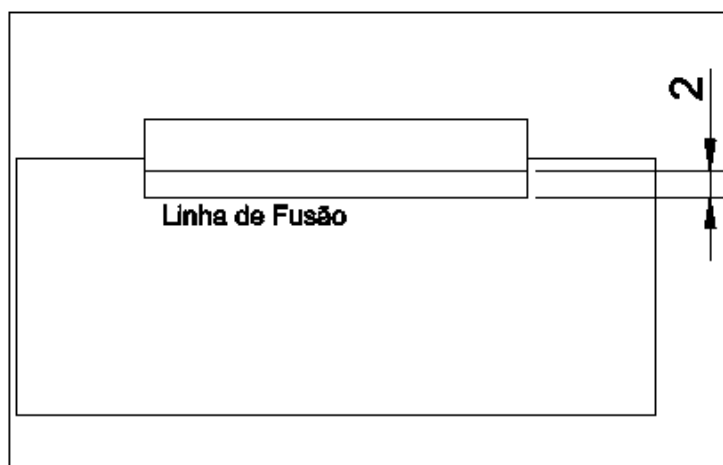


Figura 24 - Desenho esquemático com orientações para análise química do revestimento (dimensões em milímetros).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e as análises das propriedades mecânicas e microestruturais obtidos pelos ensaios realizados com os corpos-de-prova extraídos a partir das chapas revestidas.

Em se tratando de soldagem de revestimentos entre materiais dissimilares, três regiões despertam maior interesse, e são elas a zona fundida, ou seja, o material de solda (MS), a zona de interface ou de transição (ZI) entre o revestimento e o MB, e a zona afetada pelo calor (ZAC) do lado do MB. Cada uma destas regiões apresenta alterações metalúrgicas específicas e comportamentos distintos.

O principal problema metalúrgico encontrado em soldas de metais dissimilares é a formação, ao longo da interface da linha de fusão, de regiões que podem atingir durezas superiores a 400 HV, o que indica estarem constituídas de martensita e, portanto, serem frágeis. O objetivo deste trabalho é detalhar os principais aspectos metalúrgicos relacionados à soldagem de revestimento e à manutenção das propriedades mecânicas e metalúrgicas a que se deseja chegar.

4.1. Exame Visual de Solda

As peças foram 100% avaliadas conforme o código ASME IX, não sendo encontrados defeitos, respingos ou trincas superficiais, portanto, o laudo foi dado como aprovado.

Foram ainda avaliados os certificados do metal de base e dos consumíveis, além da verificação da adequação a todos os procedimentos propostos para a realização da soldagem. Todos os procedimentos foram cumpridos.

4.2. Ensaio por Líquido Penetrante

O ensaio por líquido penetrante foi realizado em 100% do acabamento e foi considerado aprovado, sem presença de trincas longitudinais ou transversais, porosidade, mordeduras ou sobreposições.

4.3. Ensaios Mecânicos

4.3.1. Ensaio de tração

O objetivo do ensaio de tração de solda é avaliar a resistência mecânica e a ductilidade da junta soldada, conforme QW 150 do AMSE IX, portanto, o ensaio realizado não fornece valores para alongamento, limite de escoamento e estrição.

O critério de aceitação foi utilizado conforme ASME IX QW – 153, que determina, através da tabela denominada pelo código como QW/QB-422 – Tensão Mínima Especificada, ksi (Figura 26). As amostras são aprovadas quando seus resultados de resistência à tração não são inferiores:

- Ao limite de resistência mínimo, especificado para o metal de base;
- Ao menor valor limite de resistência à tração especificado para o caso de materiais de base diferentes;
- A resistência à tração mínima especificada para o metal de solda, quando este tem menor que o metal de base em temperatura ambiente;
- Caso a ruptura do corpo de prova ocorra no metal de base, na região fora da solda ou da interface entre o metal e a solda, o ensaio deve ser aceito se os requisitos forem satisfeitos e desde que o valor para resistência seja até 5% menor que o limite de resistência do material de base.

A figura 25 representa parte da tabela QW/QB-422 do ASME IX:

QW/QB-422 FERROUS/NONFERROUS P-NUMBERS (CONT'D) Grouping of Base Metals for Qualification									
Ferrous (CONT'D)									
Spec. No.	Type or Grade	UNS No.	Minimum Specified Tensile, ksi (MPa)	Welding		Brazing	ISO 15608 Group	Nominal Composition	Product Form
				P-No.	Group No.	P-No.			
A 514	E	K21604	110 (760)	11B	2	102	3.1	1.75Cr-0.5Mo-Cu	Plate, 2½ in. (64 mm) max.
A 514	P	K21650	100 (690)	11B	8	102	3.1	1.25Ni-1Cr-0.5Mo	Plate > 2½ in.-6 in. (64 mm-152 mm), incl.
A 514	P	K21650	110 (760)	11B	8	102	3.1	1.25Ni-1Cr-0.5Mo	Plate, 2½ in. (64 mm) max.
A 514	Q	...	100 (690)	11B	9	102	3.1	1.3Ni-1.3Cr-0.5Mo-V	Plate > 2½ in.-6 in. (64 mm-152 mm), incl.
A 514	Q	...	110 (760)	11B	9	102	3.1	1.3Ni-1.3Cr-0.5Mo-V	Plate, 2½ in. (64 mm) max.
SA-515	60	K02401	60 (415)	1	1	101	1.1	C	Plate
SA-515	65	K02800	65 (450)	1	1	101	11.1	C-Si	Plate
SA-515	70	K03101	70 (485)	1	2	101	11.1	C-Si	Plate
SA-516	55	K01800	55 (380)	1	1	101	1.1	C-Si	Plate
SA-516	60	K02100	60 (415)	1	1	101	1.1	C-Mn-Si	Plate
SA-516	65	K02403	65 (450)	1	1	101	1.1	C-Mn-Si	Plate
SA-516	70	K02700	70 (485)	1	2	101	11.1	C-Mn-Si	Plate
SA-517	F	K11576	115 (795)	11B	3	101	3.1	0.75Ni-0.5Cr-0.5Mo-V	Plate ≤ 2½ in. (64 mm)
SA-517	B	K11630	115 (795)	11B	4	101	3.1	0.5Cr-0.2Mo-V	Plate ≤ 1¼ in. (32 mm)
SA-517	A	K11856	115 (795)	11B	1	101	3.1	0.5Cr-0.25Mo-Si	Plate ≤ 1¼ in. (32 mm)

Figura 25 – Resistência a tração para o aço AS-516 (Adaptado de ASME, 2013).

Para o aço SA-516 Gr. 70, o limite de resistência mínimo adotado pelo ASME como critério de aceitação equivale a 70 ksi, ou 485 Mpa, ou ainda 49,45Kgf/mm². A tabela abaixo apresenta os resultados dos ensaios:

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração.

Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Carga Máxima Kgf	Limite de Resistência (Kgf/mm ²) (49,45 Mín.)	Fratura	Local
1	18,70	25,10	469,37	28.000	59,65	Dúctil	Cordão de solda
2	18,80	25,10	471,88	28.400	60,18	Dúctil	Cordão de solda

Segundo SMITH (2012) dependendo da composição exata dos materiais unidos, uma gama de microestruturas pode ser formada na zona diluída e muitas vezes existe um potencial para formar uma fase de martensítica, cuja dureza será definida pelo teor de carbono fundido a partir do metal de base. A martensita está relacionada à alta dureza, mas ao mesmo tempo à fragilidade do material. Valores muito próximos ou abaixo do limite de resistência mínimo poderiam indicar presença desta fase.

Ainda segundo SMITH (2012), de um ponto de vista mecânico para aplicações de temperatura ambiente, a zona de interface entre os metais dissimilares não apresenta uma grande preocupação. A resistência à tração é elevada, e por isso não são comuns falhas nesta região.

A manutenção dos limites de resistência com valores acima do limite mínimo necessário indica que houve pouca ou nenhuma influência da diluição entre o revestimento e o metal de adição em aço carbono.

Portanto, com resultados para limites de resistência superiores ao valor mínimo, as amostras são consideradas aprovadas.

4.3.2. Ensaio de dobramento lateral

O objetivo do ensaio de dobramento lateral é avaliar se a solda tem defeitos como: trincas, falta de fusão, falta de penetração, porosidade. O ensaio é particularmente útil para revelar falta de fusão das paredes laterais e falta de fusão de raiz em juntas de topo duplo-V. Esta orientação da amostra também é usada para testar o revestimento de solda, onde regiões frágeis perto da linha de fusão são prontamente reveladas (MATHERS, 2004).

Para validar a qualificação da EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) os corpos de prova foram submetidos aos ensaios requeridos pela Norma ASME IX, Seção QW-451.2, Edição 2013, como indicado na tabela abaixo:

Tabela 13 - Ensaios Mecânicos requeridos para qualificação de EPS (ASME IX, 2013).

ESPESSURA (e) DO CP	QTDE. DE ENSAIOS REQUERIDOS			
	Tração	Dobramento Lateral	Dobramento de Face	Dobramento de Raiz
$e \leq 3/8"$ (10mm)	2	-	2	2
$e \geq 3/8"$ (10mm)	2	4	2	2

O código ASME autoriza a realização de quatro dobramentos laterais em substituição a dois dobramentos de face e dois dobramentos de raiz.

Os corpos de prova foram avaliados utilizando lentes de aumento para verificação da presença de descontinuidades, que caso fossem verificadas, todas deveriam ser medidas e avaliadas conforme os limites especificados pelo ASME IX, Seção QW-163. A Norma citada estabelece que a solda e a zona afetada pela temperatura do corpo de prova de posição transversal à solda devem estar localizadas na parte interna da porção dobrada, após o teste. O corpo de prova não deve apresentar fissuras que excedam 3 mm na solda ou na ZAC, medida em qualquer direção de sua superfície convexa, após dobramento. Descontinuidades observadas nos cantos das amostras durante o teste não devem ser consideradas, a menos que haja provas definitivas de que resultam da falta de fusão, inclusões de escória, ou outras descontinuidades internas atribuídas a dissimilaridade dos metais e as diferenças nas propriedades físicas e mecânicas entre o metal de base e revestimento de solda inox (MAGALHÃES, 2008).

Para soldas de revestimento resistente a corrosão, as descontinuidades, medidas em qualquer direção, não devem exceder 1,5mm no revestimento, e 3mm ao longo da interface de solda.

O resultado da avaliação dos corpos de prova após os ensaios de dobramento estão indicados na tabela a seguir.

Tabela 14 - Resultado da inspeção visual dos Corpos de Prova após o ensaio de dobramento.

CORPO DE PROVA Nº	DIMENSÕES (mm)		LADO SOB TENSÃO FACE/RAIZ	ÂNGULO DE DOBRAMENTO		RESULTADO DO DOBRAMENTO
	LARG.	ESP.		ESPEC	EFETIVO	
3	9,30	25,10	LATERAL	180º	180º	APROVADO
4	9,30	25,20	LATERAL	180º	180º	APROVADO
5	9,40	25,10	LATERAL	180º	180º	APROVADO
6	9,40	25,20	LATERAL	180º	180º	APROVADO

Como o ensaio de dobramento é um ensaio principalmente qualitativo (ZOLIN, 2011), os dados mais importantes obtidos nos ensaios de dobramento foram a verificação de isenção de descontinuidades e o fato de não ocorrer fratura em nenhum corpo de prova. Portanto, considerando os resultados obtidos nos ensaios de dobramento lateral todos os corpos de prova estão aprovados.

4.3.3. Ensaio de dureza

Embora o Código ASME Seção IX não faça exigência de realização de ensaio de dureza, o ensaio é requerido pela PETROBRAS em sua norma N-268 – Fabricação de Vaso de Pressão, que diz que na qualificação do procedimento de soldagem e nos testes de produção, a medição de dureza deve ser realizada com aparelho de bancada, conforme a norma ASTM E 384. Ainda segundo a norma de fabricação, o ensaio deve ser realizado em uma junta soldada com mesma especificação de material aplicável (ASTM, ASME e PETROBRAS) ao equipamento a ser ensaiado, utilizando o perfil de medições de dureza para chanfro similar ao equipamento, conforme definido na PETROBRAS N-133. As medições efetuadas com o equipamento de bancada, método “Vickers”, conforme ASTM E 384, dureza HV 5 ou HV 10, devem ser similares às aquelas obtidas em posições adjacentes com o aparelho portátil, sendo considerada aceitável uma variação máxima de +10 %. Para equipamentos que podem estar submetidas à condição de corrosão sob tensão, a variação máxima deve ser de + 5 %. Variações negativas não são aceitáveis.

O perfil de dureza foi obtido efetuando medições na seção transversal, conforme detalhado no capítulo anterior e especificado pela Norma N-133, revisão L, Anexo B, indicado na figura a seguir:

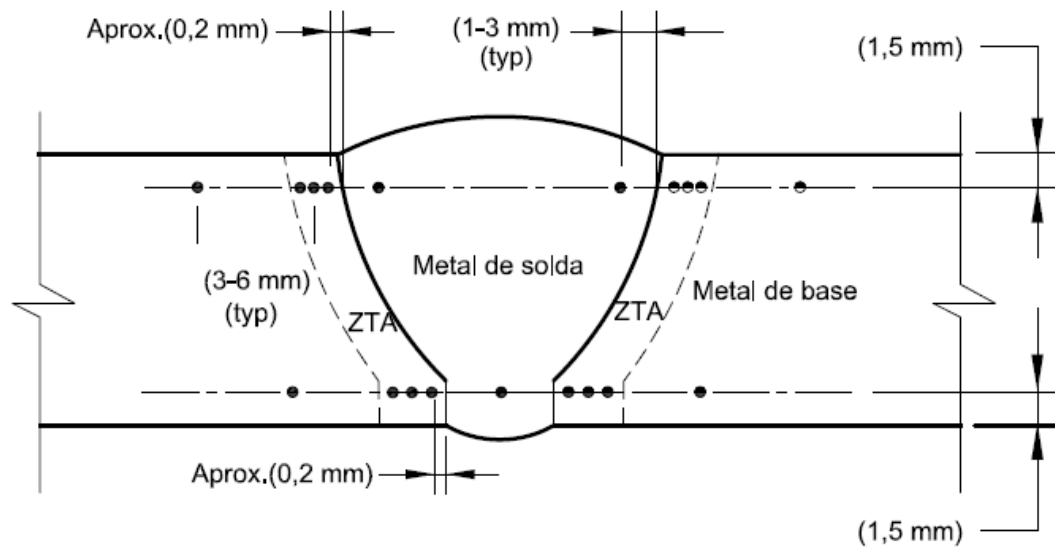


Figura 26 - Perfil de dureza para chanfro V (PETROBRAS, 2013).

A tabela 15 apresenta os resultados, tendo como limite desejado o valor de 248HV. Um dos parâmetros utilizados para determinar se certo aço é adequado para uso em meio contendo H₂S, é a dureza. A Norma NACE MR0175 determina que a dureza de um aço carbono e sua junta soldada não deve exceder o valor de 22 Rockwell C, valor equivalente aos 248HV. Se este valor limite for excedido, o aço é considerado susceptível a corrosão sob tensão, e não adequado para trabalho em ambientes ácidos.

Tabela 15 - Resultados obtidos com o ensaio de dureza.

REGIÃO	PONTO	DUREZA (HV)	PONTO	DUREZA (HV)
MATERIAL DE BASE	1	192	12	206
ZAC	2	219	13	208
	3	219	14	203
	4	212	15	208
MATERIAL DE SOLDADA	5	185		
	6	175	16	201
	7	187		
ZAC	8	191	17	208
	9	199	18	212
	10	212	19	199
MATERIAL DE BASE	11	190	20	204

A figura 27 representa a variação dos valores encontrados ao longo da seção transversal, onde, juntamente com a tabela 15, é possível verificar que os maiores valores de dureza encontram-se na Zona Afetada pelo Calor (ZAC), principalmente próximos à face superior, onde a poça de fusão formada era maior, além de também ter recebido revestimento sobre o cordão de solda. Nas proximidades de ambas as faces, os valores mais baixos foram encontrados no centro do metal de solda, e para o metal de base, os valores encontrados próximos à face inferior são maiores que os da face superior.

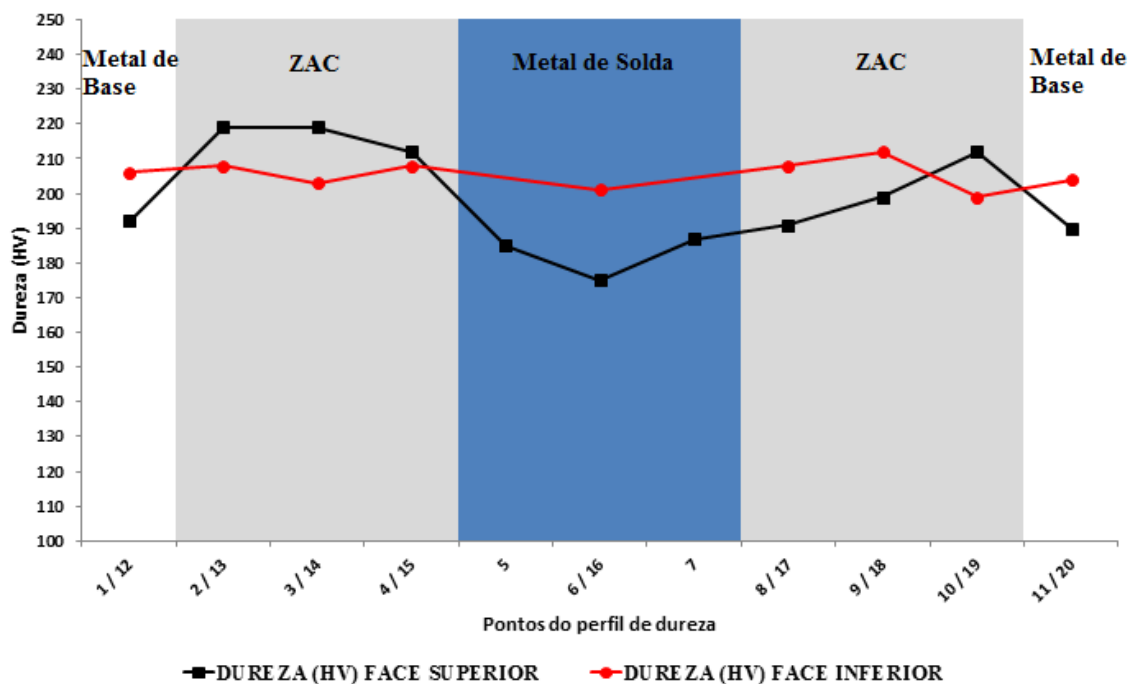


Figura 27 - Gráfico representativo dos valores de dureza por zona do corpo de prova.

A ZAC é a região que se caracteriza por apresentar um ciclo térmico de rápido aquecimento, seguindo de rápido resfriamento, causado pela fonte de energia utilizada na soldagem e por dissipação através da ZAC, respectivamente. Por esta razão o material sofre transformações metalúrgicas complexas, bem como a indução de deformações e tensões residuais. A figura a seguir mostra esquematicamente as principais regiões que podem ser observadas na ZAC de um aço carbono:

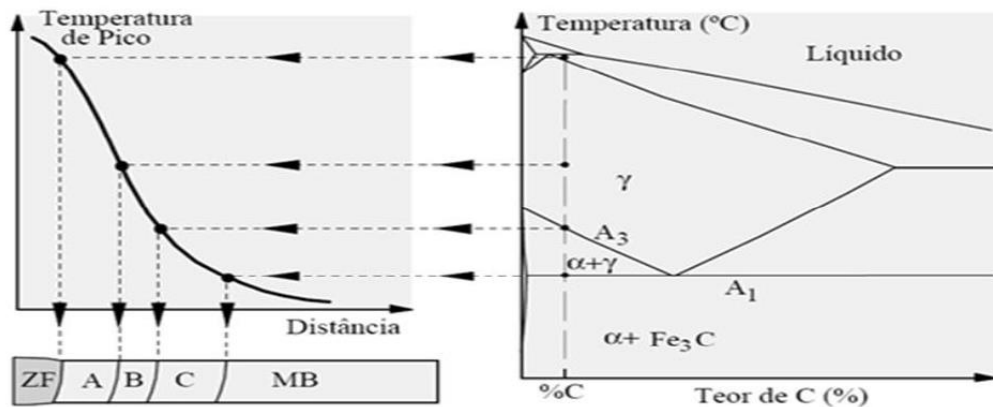


Figura 28 - Regiões de solda de um aço carbono (Guimarães).

Na figura, as letras indicam:

- ZF – Zona Fundida;
- A – Região de granulação grosseira;
- B – Região de granulação fina;
- C – Região intrínseca;
- D – Região subcrítica.

Na ZAC encontram-se as regiões de granulação grosseira e de granulação fina. A região de granulação grosseira está localizada junto à linha de fusão e submetida à temperatura de pico superior a 1200°C, e é caracterizada por um grande tamanho de grão austenítico. A microestrutura final dessa região depende da composição química do aço e da sua velocidade de resfriamento após soldagem.

Ainda que abaixo do valor de referência utilizado para dureza Vickers, os níveis de dureza mais elevados, encontrados na ZAC, podem ser justificados, segundo MODENESI (2012), pelo aumento da temperabilidade da região A (devido ao aumento do tamanho de grão austenítico), essa região é caracterizada por uma microestrutura rica em constituintes aciculares como bainita e martensita. Assim, tende a ser a região mais problemática da ZAC, podendo apresentar dureza elevada, perda de tenacidade e ser um local comum para a formação de trincas. Esses problemas são comuns para aços com teor de carbono mais elevado (maior temperabilidade e elevadas dureza e fragilidade da martensita) e para aços ligados (maior temperabilidade).

Logo, a dureza da ZAC fornece uma medida da resistência do aço nesta região e, para um dado tipo de liga, dá uma indicação de seu grau de fragilização (MODENESI et al, 1985).

Para aços C-Mn e aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), quanto mais frágil a microestrutura da ZAC e metal de solda, maior o risco de trinca a frio.

Estando todos os resultados abaixo do limite estabelecido, a amostra foi considerada aprovada.

4.3.4. Exame Macrográfico

Foi realizada uma inspeção visual da seção macrográfica, onde não foi detectada nenhuma ocorrência de defeitos como trincas, porosidades, descolamento dos revestimentos ou quaisquer outras discontinuidades de natureza metalúrgica e/ou operacional dos revestimentos depositados. Através das macrografias, observam-se os limites bem definidos entre as regiões dos revestimentos das ligas em estudo e do metal de base.

4.3.5. Ensaio Metalográfico

4.3.5.1. Análise Química

A análise química do material de revestimento foi realizada 2mm acima da linha de fusão, seguindo a norma ASTM E1086, e revelou os seguintes valores:

Tabela 16 - Resultados de análise química do revestimento realizada por espectrometria ótica.

ELEMENTO	SÍMBOLO QUÍMICO	TEOR (% por peso)
Carbono	C	0,0035%
Enxofre	S	0,008%
Fósforo	P	0,019%
Manganês	Mn	1,510%
Silício	Si	0,450%
Cromo	Cr	17,690%
Níquel	Ni	11,600%
Molibdênio	Mo	2,400%
Cobre	Cu	0,048%
Alumínio	Al	0,033%
Titânio	Ti	0,001%

As análises químicas do revestimento da liga AISI 316L apresentada indicam picos de alguns elementos de liga como o Mn, Cr, Ni e Mo, no entanto, comparando os resultados do metal depositado com a composição química fornecida em certificado pelo fabricante da fita para soldagem, nota-se um pequeno decréscimo de sua participação na composição final da

solda, que pode estar relacionado a uma discreta diluição a esta altura do material de adição, ou mesmo à ação do fluxo de soldagem.

O objetivo da análise é garantir as propriedades metalúrgicas esperadas do aço inoxidável. Sabendo que um aço AISI 316L pode apresentar de 16% a 18% de teor em peso para o Cromo, e de 10% a 14% de teor de Níquel, além de teor de Carbono de até 0,03%, pode-se considerar os resultados da amostra como satisfatórios.

4.3.5.2. Diagrama de Schaeffler

O diagrama de Schaeffler permite prever a microestrutura da Zona Fundida com base na sua composição química, sendo assim, foi montado o diagrama tomando como base as composições químicas fornecidas em certificado para o metal de base, o metal de adição em aço carbono e do metal de revestimento em aço inoxidável. Os resultados para o Ni equivalente e o Cr equivalente são mostrados a seguir:

Tabela 17 - Ni equivalente e Cr equivalente para os metais de base e de adição.

Metal de Base				
Composição	Ni	C	Mn	
	0,003	0,220	0,990	
Ni eq	7,098			
Composição	Cr	Mo	Si	Nb
	0,030	0,000	0,180	0,000
Cr eq	0,300			

Consumível SAW				
Composição	Ni	C	Mn	
	0,000	0,072	1,159	
Ni eq	2,740			
Composição	Cr	Mo	Si	Nb
	0,000	0,000	0,267	
Cr eq	0,401			

Consumível ESW				
Composição	Ni	C	Mn	
	14,100	0,012	1,750	
Ni eq	15,335			
Composição	Cr	Mo	Si	Nb
	20,300	2,900	0,250	0,020
Cr eq	23,585			

Na montagem do diagrama na figura abaixo, o ponto MB indica o metal de base, o ponto A indica o metal de adição do aço carbono, o ponto B indica o metal de adição para o revestimento e o ponto C indica a composição química da zona fundida. Como o revestimento é depositado sobre a junta soldada para união entre as chapas, esta funciona como metal de base e está sujeita à diluição.

4.3.5.3. Micrografia

A micrografia foi realizada no material de revestimento depositado sobre o cordão de solda, e revelou uma microestrutura de matriz austenítica e ferrita delta nos espaços interdendríticos. O percentual de ferrita delta ficou entre 5% e 7%, o que confirma a previsão feita com o diagrama de Schaeffler.

As micrografias da zona fundida do material de revestimento mostram uma estrutura que consiste de ferrita delta com diferentes morfologias em uma matriz de austenita. As morfologias da ferrita delta formam regiões de ferrita acicular, vermicular e ferrita de contorno de grão como mostrado na figura a seguir:

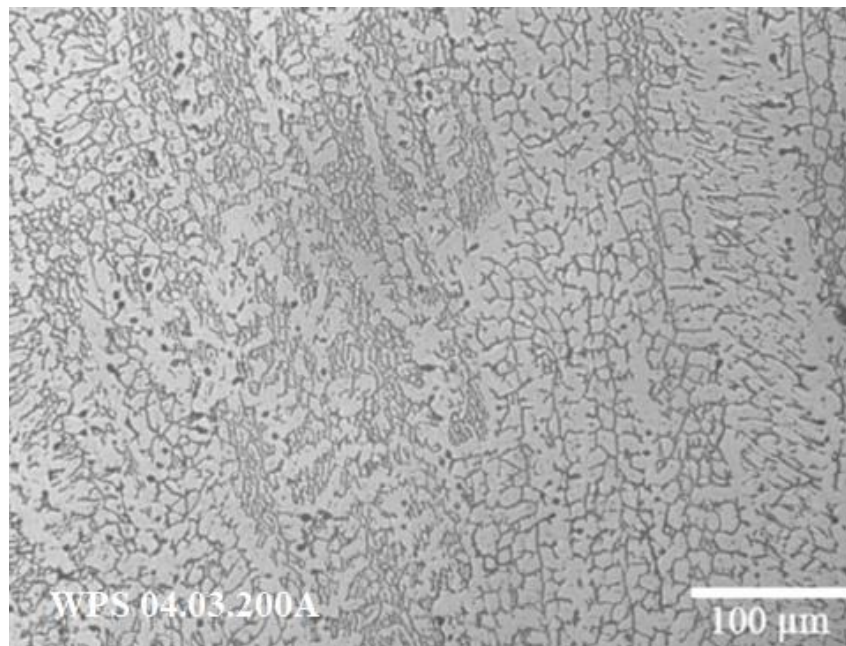


Figura 31 - Micrografia ótica da zona fundida do aço inox AISI 316L.

A ferrita delta distribuída na matriz austenítica apresenta morfologias distintas de acordo com sua formação durante a taxa de resfriamento após o processo de solda (Modenesi, 2001; Feramuz et al, 2009).

A figura 32, obtida de micrografia com aumento de 800X, apresenta ao fundo uma matriz austenítica e a fase dispersa de cor escura, encontrada com diferentes morfologias, que corresponde à ferrita delta formada na zona fundida após soldagem.

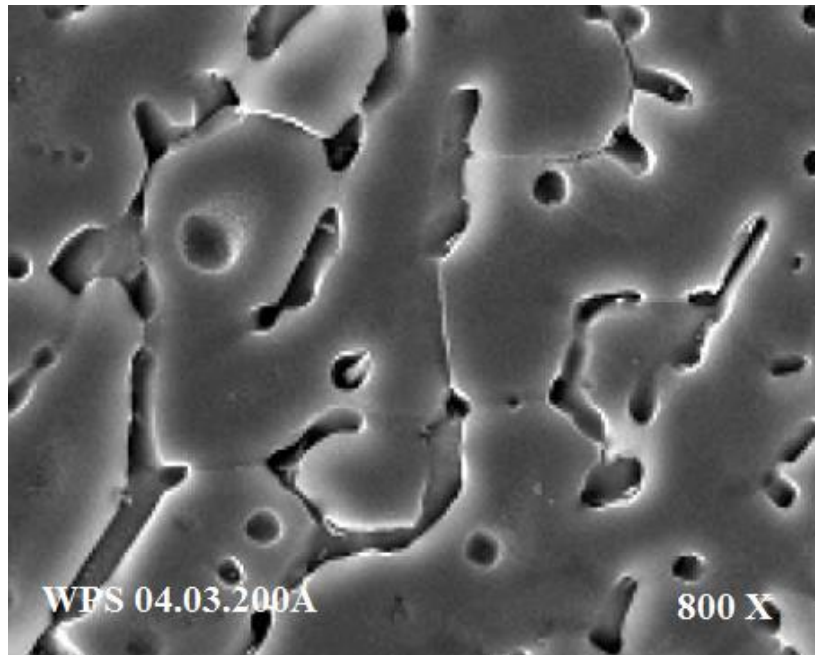


Figura 32 – Micrografia ótica da zona fundida do aço inox AISI 316L mostrando a formação da ferrita delta.

A ferrita delta é benéfica aos aços inoxidáveis austeníticos, minimizando o efeito da dissolução do cromo e prevenindo a corrosão intergranular tão indesejada nesse tipo de aço.

5. CONCLUSÃO

A análise dos dados experimentais obtidos durante o processo de qualificação de procedimento de soldagem foi realizada e, portanto, sendo apresentadas neste estudo as características mecânicas e microestruturais de um metal de base de aço carbono ASTM A516 Gr. 70 soldado pelo processo SAW, e sendo revestido através de soldagem dissimilar pelo processo ESW com o aço inox austenítico AISI 316L, deste modo chegando as seguintes conclusões:

- A aplicação de revestimentos metálicos de materiais dissimilares sobre metais de base em aço carbono pelo processo de soldagem eletroescória demonstra ser vantajosa, não só pelo menor custo e alta produtividade, mas também pela sua característica de proporcionar baixas taxas de diluição, sem prejuízo das propriedades metalúrgicas.
- O ensaio de tração demonstrou que as propriedades de resistência mecânica foram mantidas, mesmo com a adição de material dissimilar ao metal de base.
- O ensaio de dobramento comprovou a perfeita soldagem entre os materiais, não havendo qualquer indício de falta de fusão ou inclusões na região de interface.
- Os resultados para o ensaio de dureza Vickers apresentaram valores de medição ao longo da seção transversal abaixo das que poderiam indicar presença de martensita.
- Os resultados obtidos na análise química foram coerentes com os resultados previstos pelo diagrama de Schaeffler, que estimaram corretamente a microestrutura e o teor de ferrita delta (δ) das soldas resultantes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS – **Stainless Steel Cladding and Weld Overlays**. ASM Specialty Handbook: Stainless Steels, 06398G, 1994;
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM A 516/A 516 M – **Standard specification for pressure vessel plates, carbon steel, for moderate and lower temperature services**. ASTM A 516/A 516M – 90 (Reapproved 1996);
- ANDREUCCI, R. **Líquido penetrante (Apostila)**, FATEC, 2012?
- AWS. **Welding Handbook: Welding Processes**. American Welding Society, v. 2. 8th ed. Miami, 955 p., 1992.
- BALASUBRAMANIAN, V.; LAKSHMINARAYANAN, A. K.; VARAHAMOORTHY, R. E. BABU, S.; **Application of response surface methodology to prediction of dilution in plasma transferred arc hardfacing of stainless steel on carbon steel**. International Journal of Iron and Steel Research, v. 16, n. 1, p. 44-53, 2009.
- BARBOSA, R. P.; **Tecnologia Mecânica – Metalurgia da soldagem, soldabilidade dos materiais**, UNILESTE, Coronel Fabriciano-MG, 2007.
- BOHLER WELDING GROUP, **Soldagem de juntas dissimilares entre aços CrMo e aços inoxidáveis austeníticos**, Portal Metalica, 2015?.
- BOHÓRQUEZ, C. E. N, BUSCHINELLI, A. J. A, KEJELIN, N. Z.; **Soldagem Dissimilar do aço x-60 com inconel 625**. Labsolda/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis-SC.
- BROWN MCFARLANE, **Aço Inoxidável Tipos 316 e 316L**, disponível em <http://www.brownmac.com/products/stainless-steel-plate/Stainless-Steel-316-and-316l-portuguese.aspx>, acesso em 03 de março de 2016.
- BUTT, M.T.Z.; AHMAD M. S.; AZHAR, M.; **characterization for GTAW AISI 316 to AISI 316 & SA 516 grade 70 steels with welded & prewelded annealing conditions**, Journal of Quality and Technology Management Volume VIII, Issue II, December 2012, Page 119–133.
- COSTA, A. C. **Ensaio por ultrassom com as técnicas convencional A – Scan e Phased Array em juntas soldadas dissimilares de aços carbono e aço inoxidável austenítico**. Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-graduação em

Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

- DELONG, T. W.; **Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal**. Welding Journal. v.53, n.7, pp. 273-286, 1974.
- **ESAB MIG Welding Handbook** – ESAB Welding & Cutting Products, 2005.
- FAVORIT, Aços Especiais, **Aços inoxidáveis AISI 316 e AISI 316L**, disponível em <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-316-aisi-316-l>, acesso em 03 de março de 2016.
- FERREIRA, L.; GIMENEZ, L. **Soldagem de Metais Ferrosos para a Indústria de Energia**. Disponível em: http://www.infosolda.com.br/new_site/getFile.php?t=d&i=341. Acesso em: 19 novembro 2015.
- FERRIERE, A.; BAUTISTA, C. S.; RODRIGUEZ, G. P. e VAZQUEZ, A. J. **Corrosion resistance of stainless steel coatings elaborated by solar cladding process**. Solar Energy, v. 80, n. 10, p. 1338-1343, 2006.
- GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro, Ed. LTC, 4ª edição, 2003.
- GHOSH, P. K.; GUPTA, P. C. e GOYAL, V. K. **Stainless steel cladding of structural steel plate using the pulsed current GMAW process**. Welding Journal, v. 77, n. 7, p. 307-314, 1998.
- GIMENES, L.; CLARA, M. S.; **Processo de Soldagem Eletroescória**, Infosolda, Coleção de Tecnologia do SENAI-SP, São Paulo, 1997.
- 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.
- HULL, F. C.; **Effect of delta ferrite content on hot cracking of stainless steel**. **Welding Journal**. v.46, n.9, pp. 399-409, 1967.
- HUPPERTZ, P. H.; RETTER, A. **Selection of Materials for Pressure Vessels and Chemical Plants**, Materials Science & Engineering Technology, Verlag Chemie. GmbH, D-6940 Weinheim, 1980.
- IRVING, B.; **Dissimilar metal welding paves the way to new ventures**, Weld. J., 71(5):27-33, 1992.
- JEIRUD, P.; KELTJES, P.; **Electroslag cladding provides alternative to standard cladding techniques. Deposition rate, travel speed boost productivity**, the tube & pipe journal, september 2015.

- KANNAN, T. e MURUGAN, N. **Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality**. Journal of Materials Processing Technology, v. 176, n. 1-3, p. 230-239, 2006.
- KEJELIN, N. Z.; **Influência dos parâmetros de soldagem na formação de zonas parcialmente diluídas em soldas de metais dissimilares**, dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, fevereiro de 2006.
- LIMA, Luciana Iglésias Lourenço et al. **Caracterização microestrutural de soldas dissimilares dos aços ASTM A-508 e AISI 316L**. Soldag. insp. (Impr.) [online]. 2010, vol.15, n.2, pp.112-120.
- MADALENA, F. C. A.; **Estudo comparativo de revestimentos metálicos com as ligas AISI 904L e inconel 625 obtidos pelo processo de soldagem eletroescória**, Dissertação de Mestrado Apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2013.
- MADALENA, F. C. A.; JORGE, J. C. F.; SOUZA, L. F. G.; COSTA, H. R. M.; CABRAL, T. B.; **Estudo de propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável superaustenítico AISI 904L utilizado como revestimento interno de vasos de pressão fabricados em aço carbono ASTM-A-516 Grau 70**, Sétimo Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação, 20 a 24 de maio de 2013, Penedo, Itatiaia – RJ – Brasil.
- 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.
- MATHERS, G. **Bend testing**, Connect, November 2004.
- MODENESI, P, J.; **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. Senai, Osasco- SP, 2001.
- 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.

- PALANI, P. K. e MURUGAN, N. **Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW**. Journal of Materials Processing Technology, v. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007.
- PALANI, P. K. e MURUGAN, N. **Sensitivity analysis for process parameters in cladding of stainless steel by flux cored arc welding**. Journal of Manufacturing Processes, v. 8, n. 2, p. 90-100, 2006.
- PALANI, P. K.; MURUGAN, N. e KARTHIKEYAN, B. **Process parameter selection for optimising weld bead geometry in stainless steel cladding using Taguchi's approach**. Materials Science and Technology, v. 22, n. 10, p. 1193-1200, 2006.
- PATEL, Mitul, MADMANIA, R.H., CHAUHAMB B.J. e SUNDARESANB S. **Application of Electroslag Strip Cladding for Reactors in Hydrogen-Based Refinery Service**, M .S. University, Vadodara, Mar, 2013.
- PATEL, Mitul, MADNANIA, R. H. , CHAUHANB, B. J., SUNDARESANB S. **Application of electroslag strip cladding for reactors in hydrogen-based refinery service**. Dept. of Met. & Matls. Engg., M .S. University, Vadodara, 2009.
- PAULO J. MODENESI, P. J; MARQUES, P. V; SANTOS, D. B; **Introdução à Metalurgia da Soldagem (Apostila)**, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG-MG, 2012.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. N-133 – **Soldagem**. Comissão de Normalização Técnica – CONTEC, PETROBRAS, 2014.
- PHILLIPS, A. L. Welding Handbook: **Special Welding Processes and Cutting**. London: American Welding Society, Vol. 3, 1965.
- QUALITY SOLDAGENS, **Soldagem de Revestimento Duro**, disponível em http://www.qualitysoldagens.com.br/?pg=servicos_all&id=16, acesso em 09 de fevereiro de 2016.
- RAO, Venkateswara, RAO, N.B.R. Mohan and RAMBABU, K. **“Disbonding Studies of Austenitic Stainless Steel Weld Overlays on 2,25 Cr-1 Mo Steels**. Issue 2, Vol.5, July 2012.
- RIBEIRO F. A. S., **Modificações da Composição Química do Aço Inoxidável Duplex Vazado 25Cr-6Ni-3Mo-3Cu para melhoria da Resistência à Corrosão por Picadas**, Dissertação de MSc., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008.

- ROHDE, R. A. **Metalografia Preparação De Amostras - Uma abordagem prática.** LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, Santo Ângelo, 2010.
- SANTIAGO, Eduardo Ferrer. **Apostila sobre Vasos de pressão.** UFU, s/d. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAsgYAJ/> apostila-sobre-vasos-pressao#. Acesso feito em setembro./2016.
- S.D. Brandi, S. Liu, Thomas, Jr., R.D., **Welding, Brazing and Soldering. Electroslag and Electrogas Welding***, v. 15, ASM Handbook, ASM International, 2008, pp 124-138.
- SCHAEFER, A., **Dissimilar Metal Weld Failure Problems in Large Steam Generators.** *Power*, 1979, N. 12, p.68-69.
- SHAHI, A. S. e PANDEY, S. **Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding procedures.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 196, n. 1-3, p. 339-344, 2008.
- SILVA, M. M.; SANTOS, D. G.; SANTOS, M. A.; MACIEL, T. M.; MOTTA, M. F. **Influência do aporte térmico na soldagem dissimilar entre os aços ASTM A516 Gr 60 e AISI 317L empregados no setor de petróleo e gás**, quinto Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 18 a 22 de outubro, Fortaleza, 2009.
- SMITH, Liane. **Engineering with CLAD STEEL.** 2nd Edition, Nickel Institute Technical Series No 10 064, October, 2012.
- TELLES, Pedro C. S. **Vasos de pressão.** 2ª. Edição, Editora LTC, 1996.