

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

ALESSANDRO DAL ZOTTO

**INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM DOS
AÇOS INOX ASTM A240 E PATINÁVEL SAC 350 APLICADO AO SEGMENTO
FERROVIÁRIO**

CAXIAS DO SUL

2016

ALESSANDRO DAL ZOTTO

**INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM DOS
AÇOS INOX ASTM A240 E PATINÁVEL SAC 350 APLICADO AO SEGMENTO
FERROVIÁRIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico. Área de concentração: Engenharia
Mecânica

Orientador Prof. Me. Victor Hugo Velazquez
Acosta.

CAXIAS DO SUL

2016

ALESSANDRO DAL ZOTTO

**INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM DOS
AÇOS INOX ASTM A240 E PATINÁVEL SAC 350 APLICADO AO SEGMENTO
FERROVIÁRIO**

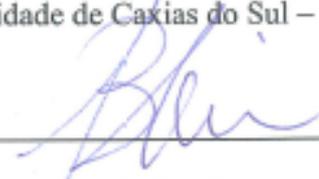
Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico. Área de concentração: Engenharia
Mecânica

Aprovado em 08/12/2016

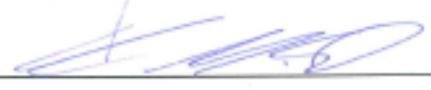
Banca Examinadora



Prof. Me. Víctor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Me. Fernançã Bordin
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Me. Deives Roberto Bareta
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho a todos os professores do curso, que me acompanharam durante a graduação. A minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. A minha namorada que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldade e também minha irmã pelo incentivo e o carinho durante esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ser a base das minhas conquistas.

Aos meus pais Alexandre Antonio Dal Zotto e Angélica Maria Trentin Dal Zotto, por acreditarem em minhas escolhas, apoiando-me e esforçando-se junto a mim, para que eu suprisse todas elas.

Ao Prof. Victor Hugo Velazquez Acosta, pela dedicação em suas orientações prestadas na elaboração deste trabalho, me incentivando e colaborando no desenvolvimento de minhas ideias.

*“Eu gosto do impossível porque lá
a concorrência é menor”*

Wall Disney

RESUMO

A utilização do processo de soldagem a arco com atmosfera de proteção gasosa, GMAW, é importante para a indústria metal mecânica, pois possibilita a formação de juntas similares e dissimilares. Este trabalho de conclusão de curso apresenta um breve estudo sobre a influência do metal de adição no processo de união dos aços inoxidável ASTM A240 e patinável SAC 350 aplicado a produção de vagões ferroviários. Os conceitos utilizados abordaram dois temas principais: a soldabilidade de aços inoxidáveis e patináveis, bem como o custo do processo de soldagem com ênfase nas três classes de metais de adição utilizados (ER308 LSi, ER309 LSi e ER410L). Para tal experimento, foram produzidas seis amostras semelhantes as juntas soldadas no processo atual da empresa e submetidas a ensaios radiográficos, tração, dobramento e metalografia, com intuito de qualificar um novo consumível para o processo. O ensaio radiográfico verificou a existência de porosidades e descontinuidades nas juntas soldadas com o intuito de inibir que uma junta com defeito prosseguisse nos ensaios. O ensaio destrutivo de tração proporcionou examinar e aprovar a utilização dos três arames propostos, uma vez que obtiveram valores de limite de ruptura acima do valor mínimo do metal base. Em relação ao ensaio de dobramento todos os corpos de provas foram aprovados por não apresentarem nenhum tipo de trinca durante o experimento. A análise metalográfica comprovou todas as regiões prognosticadas no diagrama teórico de Schaffler, onde tanto a zona fundida das juntas similares quanto as dissimilares, apresentaram uma região predominantemente austenítica para o ER 308LSi e ER 309LSi e martensítica para o ER 410L. Todos esses ensaios contribuíram para a validação do arame ER 309LSi utilizado atualmente na fabricação do implemento e a qualificação de um novo metal de adição ER 308LSi. Entretanto foi possível observar que a microestrutura martensítica apresentada pelo ER 410L aliado aos valores elevados para o perfil de dureza do mesmo, indicou uma região possivelmente frágil o que numa eventual aplicação restringiria sua utilização para locais com menores solicitações mecânicas. Por fim, com a substituição do metal de adição ER 309LSi pelo ER 308LSi, seria possível uma redução de até 13% no custo do arame para fabricação do implemento ferroviário.

Palavras-chave: Soldagem GMAW. Consumíveis. Ensaios.

ABSTRACT

The use of arc welding process with protective gas atmosphere, GMAW, is important to the metalworking industry because it enables the formation of similar and dissimilar joints. This final project presents a brief study on the influence of filler metal in the process of Union of stainless steel ASTM A240 and patinável SAC 350 applied to production of railway wagons. The used concepts addressed two main issues: the weldability of stainless steels and skid able, as well as the cost of welding process with emphasis on the three classes plus metal used (ER308LSi, ER309LSi and ER410L). For this experiment, produced six samples similar to the welded joints in the current process of the company and submitted to radiographic tests, traction, folding and metallography, in order to qualify a new consumable for the process. The radiographic test verified the existence of any pores and discontinuities in welded joints in order to inhibit that a faulty gasket proceed in rehearsals. The destructive test of traction provided consider and approve the use of the three proposed wires, once they obtained values of breaking point above the minimum value of the base metal. In relation to the folding test all bodies of evidence have been approved for not submitting any kind of bite during the experiment. Metallographic analysis proved all predicted regions in theoretical diagram Shaffer, where both the fused zone similar joints as dissimilar, presented a predominantly austenitic region to the ER308LSi and ER309LSi and to the ER410L martensitic. All these essays contributed to the validation of the wire ER 309LSi currently used in the manufacture of equipment and qualification of a new filler metal ER 308LSi. However it was possible to observe that the Martensitic microstructure by ER 410L ally to high values for the hardness of the profile indicated a potentially fragile region what a possible application would restrict its use to places with lower mechanical stress. Finally, with the replacement of the filler metal ER 309LSi at ER 308LSi, would it be possible for a reduction of up to 13% on the cost of the wire for the manufacture of railway equipment.

Keywords: GMAW Welding. Consumables. Mechanical Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Vagão ferroviário modelo Gôndola para transporte de minério	15
Figura 2.1 – Processo esquemático de soldagem GMAW	18
Figura 2.2 – Penetração em soldagem GMAW com diferentes gases de proteção	18
Figura 2.3 – Microestrutura de solda de um aço inox ferrítico	24
Figura 2.4 – Fragilização por sensitização	26
Figura 2.5 – Fragilização por hidrogênio	26
Figura 2.6 – Diagrama de Schaffler	29
Figura 2.7 – Diagrama de De Long	30
Figura 2.8 – Camada de pátina em um aço patinável	31
Figura 2.9 – Região crítica para soldagem de juntas dissimilares.....	33
Figura 3.1 – Juntas soldadas entre materiais similares e dissimilares	36
Figura 3.2 – Fluxograma de caracterização das amostras	38
Figura 3.3 – Corpos de provas cortados pelo processo de guilhotina.	39
Figura 3.4 – Juntas soldadas dissimilar e similar	39
Figura 3.5 – Máquina de solda utilizada no processo de soldagem.	40
Figura 3.6 – Equipamento utilizado para o ensaio de tração e dobramento.....	43
Figura 3.7 – Corpos de prova preparados para teste de tração	43
Figura 3.8 – Corpos de prova preparados para teste de dobramento.....	44
Figura 3.9 – Corpos de prova para análise metalográfica	45
Figura 4.1 – Comparativo do limite de ruptura entre juntas similares	48
Figura 4.2 – Alongamento final entre juntas similares.....	48
Figura 4.3 – Comparativo do limite de ruptura entre juntas dissimilares.....	49
Figura 4.4 – Comparativo do alongamento final entre juntas dissimilares	50
Figura 4.5 – Diagrama de Schaffler aplicado a juntas similares	51

Figura 4.6 – Diagrama de Schaffler aplicado a juntas dissimilares	52
Figura 4.7 – Comparativo entre dureza da região soldada para juntas similares	53
Figura 4.8 – Comparativo entre dureza da região soldada para juntas dissimilares.....	54
Figura 4.9 – Ensaio Macrográfico	55
Figura 4.10 – Microestrutura dos metais base	55
Figura 4.11 – Microestrutura junta similar ER 308LSi	56
Figura 4.12 – Microestrutura junta similar ER 309LSi	56
Figura 4.13 – Microestrutura junta similar ER 410L	57
Figura 4.14 – Microestrutura junta dissimilar ER 308LSi	58
Figura 4.15 – Microestrutura junta dissimilar ER 309LSi	58
Figura 4.16 – Microestrutura junta dissimilar ER 410L.....	59
Figura 4.17 – Comparativo entre ensaios das juntas similares e dissimilares.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Aplicação dos aços inoxidáveis.....	21
Quadro 2.2 – Problemas de soldabilidade dos aços inox.	25
Quadro 2.3 – Condição de soldabilidade para %Ceq.	32
Quadro 4.1 – Resultados do ensaio radiográfico.....	46
Quadro 4.2 – Resultados do ensaio de dobramento	51
Quadro 4.3 – Descrição diagrama de Schaffler para juntas similares e dissimilares	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química dos aços utilizados	37
Tabela 3.2 – Composição química do metal de adição utilizado	37
Tabela 3.3 – Parâmetros de soldagem GMAW	41
Tabela 3.4 – Composição química dos metais de adição para realização dos testes.....	41
Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas dos consumíveis	41
Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de tração para juntas similares inox-inox.....	47
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas dos metais base.....	47
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de tração para juntas dissimilares inox-SAC350	49
Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de microdureza juntas similares.....	53
Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de microdureza juntas dissimilares	54
Tabela 4.6 – Custo dos metais de adição.....	61
Tabela 4.7 – Percentual de elementos de liga de cada metal de adição	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DESENVOLVIMENTO	14
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	PROCESSOS DE UNIÃO DE METAIS	17
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW	17
2.2.1	Tipos de transferência metálica	19
2.2.2	Transferência metálica por curto circuito	19
2.2.3	Transferência metálica globular	19
2.2.4	Transferência metálica em aerossol.....	20
2.2.5	Transferência metálica pulsada	20
2.3	CHAPAS DE AÇO PARA VAGÕES SOLDADOS	20
2.3.1	Aços inoxidáveis.....	21
2.3.2	Aços inoxidáveis ferríticos	23
2.3.2.1	Microestrutura da região soldada	23
2.3.2.2	Soldabilidade do aço inox ferrítico	25
2.3.2.3	Sensitização	26
2.3.2.4	Fragilização por hidrogênio.....	26
2.3.2.5	Fragilização pelo crescimento de grão	27
2.3.2.6	Consumíveis de soldagem	27
2.3.3	Diagramas de Schaeffler e De Long.....	28
2.3.4	Aço carbono	30
2.3.5	Aço patinável.....	31
2.3.6	Soldabilidade do aço patinável.....	32
2.4	CARBONO EQUIVALENTE	32
2.5	SOLDAGEM DE JUNTAS DISSIMILARES	33
2.6	DILUIÇÃO.....	34
2.7	CUSTOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM	34

3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	36
3.1	PROCESSO ATUAL E MATERIAIS	36
3.2	CORPOS DE PROVA.....	39
3.2.1	Processo de soldagem utilizado para a fabricação dos corpos de prova	40
3.2.2	Consumíveis de soldagem	41
3.3	ENSAIOS	41
3.3.1	Caracterização visual	42
3.3.2	Ensaio radiográfico	42
3.3.3	Ensaio de tração.....	42
3.3.4	Ensaio de dobramento guiado	44
3.3.5	Ensaio metalográfico	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	ANÁLISE VISUAL	46
4.2	ANÁLISE RADIOGRÁFICA.....	46
4.3	RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	47
4.4	RESULTADOS DO ENSAIO DE DOBRAMENTO GUIADO	50
4.5	PREDICÇÃO DA REGIÃO DA SOLDA	51
4.6	MICRODUREZA.....	53
4.7	RESULTADOS DO ENSAIO DE METALOGRAFIA.....	54
4.7.1	Macrografia	54
4.7.2	Metalografia.....	55
4.7.3	Comparação dos resultados das metalografias.....	59
4.8	CUSTO DO ARAME DE SOLDA	60
5	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	66
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM 108	67
	ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM 111	68
	ANEXO C – PROCEDIMENTO QUALIFICAÇÃO DE SOLDADOR 115	69
	ANEXO D – RELATÓRIO INSPEÇÃO RADIOGRÁFICA.....	70

1 INTRODUÇÃO

A crise econômica pela qual o Brasil está passando reflete diretamente nas empresas, fazendo-as cada vez mais buscar recursos tecnológicos com o intuito de combater gastos desnecessários e investir em estudos que otimizem os processos de manufatura para que possam competir de forma inovadora no mercado, baixando custos e elevando a qualidade do produto. Para a indústria metal mecânica, o processo de soldagem é considerado muito importante, visto que é responsável por unir as peças que compõe o produto final. Por tal importância este processo acaba sendo também responsável por grande parte do custo de produção do mesmo.

Boa parte das empresas que atuam no ramo metalúrgico encontram dificuldades para trabalhar com a soldagem do aço inoxidável devido à complexidade que o processo exige, como por exemplo a necessidade de aquecimentos e controle de impurezas. Muitos destes problemas podem estar interligados as técnicas, variáveis, procedimentos e consumíveis escolhidos de maneira incorreta durante os processos de soldagem (CARVALHO, 2012).

No ramo ferroviário a aplicação do aço inox ferrítico se torna importante quando se tem componentes que possuem sua superfície diretamente exposta ao desgaste abrasivo. Para isto o processo utiliza-se da união de aços ao carbono e/ou inoxidáveis.

Em contraste com este cenário, o emprego de juntas dissimilares intensifica-se por permitir a combinação de aços com baixo e alto valor agregado na fabricação do produto, uma vez que apenas alguns componentes são expostos ao desgaste abrasivo, podendo assim utilizar materiais com menor resistência a abrasão para as peças que sofrem menor desgaste. Este método é muito aplicado na indústria metalúrgica para produção de vagões ferroviários.

O estudo dessas regiões soldadas é importante para as empresas visto que todos os fenômenos envolvidos no processo de união dos materiais têm profunda relação com a ductilidade, com o surgimento de trincas e outros problemas relacionados a estrutura do material, os quais são responsáveis por exercerem grande influência na segurança das estruturas soldadas (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

1.1 DESENVOLVIMENTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso, foi realizado em conjunto com a Engenharia de Processos e o setor Ferroviário da Randon Implementos e Participações LTDA, empresa fundada em 1949 e maior fabricante de Reboques e Semirreboques da América Latina, com liderança nacional do mercado e grande expansão no segmento ferroviário.

A engenharia de processos da Randon Implementos é a principal responsável por desenvolver e aplicar novas tecnologias aos processos de fabricação da empresa. Nos diferentes setores que a compõe, existem profissionais dedicados exclusivamente para controlar, avaliar e garantir a qualidade e segurança de todos os produtos que são provenientes dos processos de soldagem manual, semiautomática e robotizada.

De uma maneira geral, quase todos produtos produzidos pela empresa segue uma linha de fabricação do chassi até a caixa de carga, para posterior acoplamento com peças provenientes da pré-montagem e estamparia. O estudo foca o segmento ferroviário com base no modelo de vagão Gôndola representado na figura 1.1 utilizado principalmente no transporte de minério.

Figura 1.1 – Vagão ferroviário modelo Gôndola para transporte de minério



Fonte: adaptado de Randon Implementos (2016).

Para o desenvolvimento das atividades experimentais o setor Ferroviário e o setor de Ferramentaria colaboraram com o processo de soldagem dos corpos de prova e a usinagem. Para a execução dos testes de tração e dobramento, o laboratório da qualidade da Randon disponibilizou os equipamentos para realização dos corpos de prova e o laboratório de metalografia da UCS disponibilizou o ensaio metalográfico calibrado.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Tendo em vista um mercado cada vez mais disputado, onde o principal diferencial das empresas está diretamente ligado ao menor preço do produto com maior qualidade, o segmento ferroviário busca desenvolvimento de tecnologias na utilização de diferentes tipos de

consumíveis para reduzir o valor do custo de cada processo de fabricação. No entanto a alteração do arame de soldagem implica na mudança das características da junta soldada e desta forma existe a necessidade de realizar testes práticos para verificar se os processos estarão de acordo com o método atual utilizado pela empresa. Estes ensaios buscaram monitorar aspectos importantes como o surgimento de trincas, resistência ao desgaste abrasivo da região soldada, o coeficiente de segurança e a resistência mecânica do produto, indicando assim a possibilidade ou não para substituição do arame utilizado. Por fim este trabalho contribuiu para evidenciar os resultados até então desconhecidos tecnicamente quanto a utilização dos metais de adição ER 308LSi, ER 309 LSi e ER 410L e também para a validação de metais de adição diferentes possibilitando uma alternância de aplicação de acordo com os custos dos mesmos no mercado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Caracterizar as propriedades mecânicas e metalúrgicas das juntas soldadas em aços inoxidável ASTM A240 e patinável SAC350 pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), comparando três tipos de metais de adição.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) buscar na bibliografia os tipos de transferência metálica utilizados no processo de união de chapas de aços inox ferrítico e aço patinável;
- b) descrever as propriedades dos aços inoxidável ASTM A240 e patinável SAC350 em relação a soldabilidade;
- c) fabricar corpos de prova na junta soldada de acordo com os metais de adição especificados pela empresa (ER 308 LSi, ER 309LSi e ER 410L);
- d) realizar ensaio visual dos corpos de prova;
- e) qualificar procedimento de soldagem através de testes de tração e dobramento;
- f) realizar ensaios metalográficos;
- g) verificar a disponibilidade de substituição do insumo atual por um de menor custo e mantendo ou maximizando as propriedades requeridas pela norma do material e do componente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo foram apresentados as características e propriedades do aço inoxidável ASTM A240 e do aço patinável SAC 350, descrevendo os metais de adição recomendados pela bibliografia para a soldagem GMAW. Também foi abordado o processo de soldagem, a união de metais base dissimilares e similares além de uma breve descrição da diluição da junta soldada.

2.1 PROCESSOS DE UNIÃO DE METAIS

O processo de união de materiais é responsável por dar forma e gerar o produto final nas mais variadas empresas do mundo. Para tal aplicação divide-se em dois principais grupos, onde um fundamenta-se na junção das peças por parafusos e rebites, as quais estão baseadas na ação de forças macroscópicas. De outra forma tem-se a união formada pela interação entre átomos e moléculas ou ainda pela adição de um metal, como por exemplo a brasagem, soldagem e colagem que estão submetidas a forças microscópicas (MARQUES; MODENESI; BRACARENCE, 2006).

A técnica de soldagem cresceu muito nos últimos anos devido a facilidade de emprego na fabricação dos diversos tipos de produtos. A indústria de implementos rodoviários detém uma grande parcela da aplicação e isso faz com que as empresas busquem o desenvolvimento dos equipamentos e consumíveis para proporcionar uma solda de qualidade (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

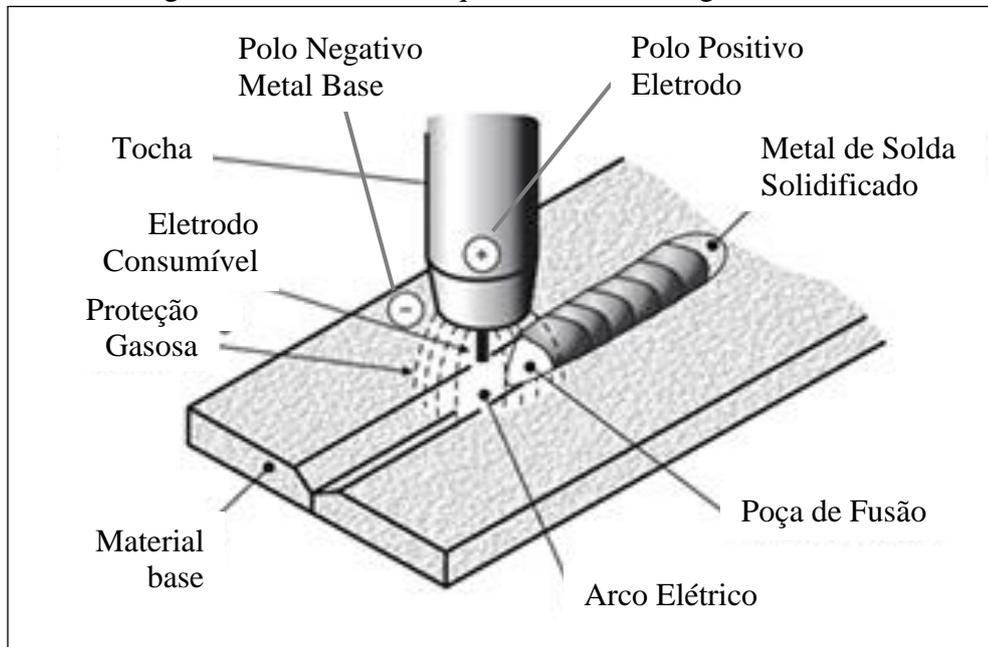
Atualmente o processo de GMAW também conhecido como MIG/MAG, é o método mais utilizado para união de materiais em todo o mundo. Outros tipos de processos podem ser citados como a soldagem a plasma, TIG (*Tungsten Inert Gas*), eletrodos revestidos, solda por resistência, fricção entre outros (MARQUES; MODENESI; BRACARENCE, 2006).

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

A soldagem a arco com atmosfera de proteção gasosa (GMAW) representado na figura 2.1, inicia quando ocorre a formação do arco elétrico através do contato do arame consumível com o material base, circulando desta forma corrente elétrica entre o polo positivo e negativo, ocasionando um aumento de temperatura entre os materiais em contato até atingir a temperatura de fusão, formando assim a zona fundida a qual é responsável por efetuar a solda da junta. Parte

desta zona fundida é composta do metal de adição e a outra parte é resultado da combinação do arame consumível e do metal base, caracterizado como diluição (ESAB, 2014).

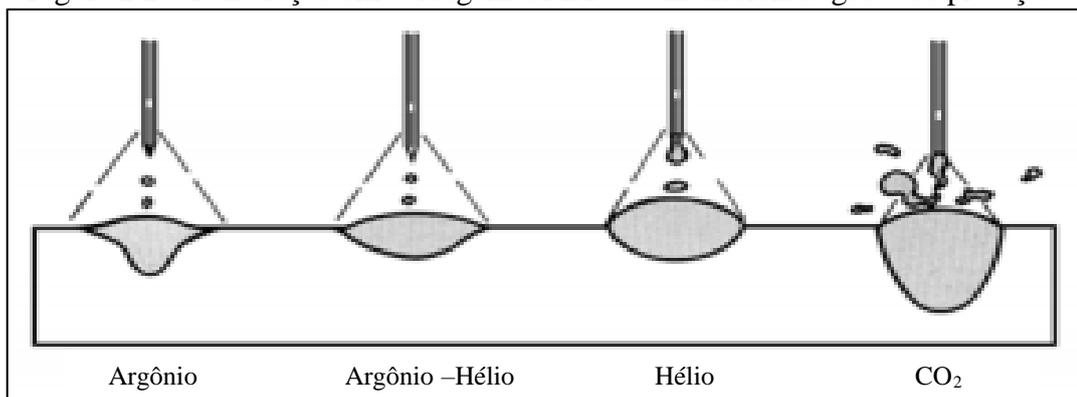
Figura 2.1 – Processo esquemático de soldagem GMAW



Fonte: adaptado de ESAB (2014).

Os gases de proteção são empregados na cobertura da poça de fusão, e são os responsáveis por expulsarem os gases atmosféricos da região de solda. Dependendo das propriedades físicas e químicas dos mesmos, podem influenciar na ionização e formação do arco elétrico, na estabilidade do processo, no modo de transferência metálica, nas propriedades mecânicas do material depositado e no aspecto superficial do cordão de solda (ESAB, 2014). A figura 2.2 ilustra o perfil de penetração em soldagem GMAW, com diferentes gases de proteção.

Figura 2.2 – Penetração em soldagem GMAW com diferentes gases de proteção



Fonte: adaptado de ASM (1994).

O método de soldagem GMAW é amplamente utilizado na indústria de manufatura, tendo aplicabilidade na soldagem de metais com importância comercial, tais como aço carbono, aço inoxidável, alumínio e cobre. É considerado um dos processos mais propícios para a aplicação robótica, uma vez que possui repetibilidade para maior produtividade e facilidade de automatização (BINGUL; COOK, 2006; ATES, 2007).

2.2.1 Tipos de transferência metálica

O processo MIG/MAG é caracterizado por formar uma poça de fusão devido à alta temperatura incluindo um metal de adição. O momento que ocorre a fusão da ponta do eletrodo até sua transferência para o metal base é muito importante, visto que influencia em algumas características do processo. Marques, Modenesi e Bracarense (2009) explicam que a transferência metálica pode afetar a estabilidade do arco, a quantidade de metal absorvido pelo metal fundido, as posições de soldagem e o nível de respingos gerado. De uma forma geral, a soldagem GMAW constitui quatro formas de transferência do material de adição do eletrodo para a peça, as quais são designadas como curto circuito, globular, axial em aerossol (spray) e axial por corrente pulsada (MACHADO, 1996).

2.2.2 Transferência metálica por curto circuito

Este tipo de transferência está caracterizado pela utilização de baixas tensões e correntes durante a soldagem, resultando em respingos, instabilidade do arco elétrico e baixa penetração. Devido a característica de não utilizar muito calor, este tipo de transferência é indicado para a união de peças de pequena espessura, além de ser bastante empregado na soldagem fora de posição, uma vez que a tensão superficial atrai a gota de metal de adição formada na extremidade do eletrodo em direção a poça de fusão (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

2.2.3 Transferência metálica globular

A transferência globular está relacionada com a utilização de valores inferiores de corrente e tensão quando comparado ao modo de transferência por curto circuito. A formação das gotas metálicas é diretamente proporcional a corrente utilizada no processo, diminuindo seu diâmetro à medida que a corrente aumenta. Este processo não é recomendado para soldagem

fora de posição, possui média penetração e a passagem do metal fundido para a poça de fusão ocorre pela ação da gravidade através do arco elétrico formado. Este tipo de transferência é caracterizado por um número de respingos elevado (MARQUES; MODENESI; BRACARENCE, 2009).

2.2.4 Transferência metálica em aerossol

Este tipo de transferência ocorre quando se eleva a corrente elétrica até um valor chamado corrente de transição, proporcionando a mudança da transferência globular para aerossol, combinada com determinados gases ou misturas de proteção (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Devido a corrente ser elevada e o diâmetro da gota metálica muito pequena, o processo é indicado principalmente para a soldagem de chapas grossas devida a alta energia que a peça é submetida. Também pode ser aplicado a qualquer tipo de posição, já que as gotas metálicas sofrem ações de várias forças eletromagnéticas, as quais sobrepõem as forças gravitacionais (MARQUES; MODENESI; BRACARENCE, 2009).

2.2.5 Transferência metálica pulsada

Este tipo de transferência metálica é caracterizado pela variação dos níveis de corrente, sendo uma muito baixa nomeada corrente de base, ocorrendo apenas no início da fusão do metal de adição e a outra chamada corrente de pico, cujo valores ultrapassam a corrente de transição do processo globular, fazendo com que haja a passagem de uma única gota para a peça (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Combinando estes aspectos, a transferência metálica pulsada alcança características do processo por aerossol, com algumas vantagens em relação a soldagem de chapas mais finas e por possibilitar a soldagem em todas posições, uma vez que opera com uma corrente inferior à de transição atribuindo menos energia ao processo de soldagem.

2.3 CHAPAS DE AÇO PARA VAGÕES SOLDADOS

Dentre os principais tipos de implementos ferroviários utilizados para o transporte de cargas, o vagão de modelo gôndola é submetido a grandes esforços mecânicos e condições climáticas diversas, que conseqüentemente ocasionam um desgaste acelerado de seus componentes. Com intuito de minimizar estes problemas, a utilização de aços com alta

resistência mecânica e ao desgaste abrasivo (esse, proporcionado pelo atrito do produto transportado com a superfície do vagão), são combinados no processo de fabricação do implemento.

A Randon Implementos atualmente utiliza no processo de fabricação do vagão gôndola o aço ASTM A240, uma categoria de aço inox caracterizado por apresentar uma microestrutura ferrítica aplicada principalmente em regiões que sofrem grande desgaste abrasivo causado pelo transporte/descarga do minério. Já o aço patinável SAC 350, qualificado por apresentar a formação de uma camada natural de óxidos em sua superfície devido as ações climáticas, contribui para aumentar a vida útil da estrutura do implemento.

2.3.1 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são materiais caracterizados por serem altamente ligados em sua composição química, podendo conter cromo níquel e molibdênio. Neste arranjo de elementos, o cromo é o principal elemento de liga sendo responsável por garantir boa resistência a corrosão quando comparado com os aços ao carbono. O material oxida quando entra em contato com o oxigênio do ar, formando uma película fina e estável de óxido de cromo. Esta camada formada chama-se camada passiva, a qual deve possuir teor mínimo de 11% de cromo, para que assim proteja a superfície dos aços contra processos corrosivos (ACESITA, 2006).

De acordo com Karlsson (2005) os aços inoxidáveis são classificados segundo sua microestrutura em aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos, austeníticos e endurecíveis por precipitação. A definição do tipo de microestrutura de cada aço inoxidável é resultado da quantidade existente de elementos de ligas em sua composição química. Desta forma alguns elementos como cromo, silício, molibdênio, titânio e nióbio estabilizam a ferrita enquanto o níquel, nitrogênio e manganês estabilizam a austenita (ACESITA, 2006). O quadro 2.1 mostra algumas aplicações para os aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos.

Quadro 2.1 – Aplicação dos aços inoxidáveis

(continua)

Classificação do aço inox	Aplicação
Austenítico (baixo carbono, elevado cromo e níquel)	equipamentos para indústria química e petroquímica; equipamentos para a indústria alimentícia e farmacêutica; construção civil; baixelas e utensílios domésticos.

(conclusão)

Classificação do aço inox	Aplicação
Ferrítico (baixo carbono, elevado cromo)	eletrodomésticos (fogões, geladeiras); moedas, talheres; indústria ferroviária e automobilística.
Martensítico (alto carbono, elevado cromo)	Cutelaria; instrumentos cirúrgicos; disco de freio.

Fonte: adaptado de Acesita (2006).

Os aços inoxidáveis martensíticos são caracterizados por apresentar em sua composição ligas de Fe-Cr-C, contendo entre 12 e 18% de cromo e 0,1 e 0,5% de carbono e devido a sua alta temperabilidade são endurecidos por tratamento térmico com extrema facilidade. Suas principais aplicações estão voltadas para processos que exigem elevada resistência mecânica, dureza e abrasão, porém apresentam uma resistência a corrosão inferior quando comparado aos outros tipos de aços inox (MODENESI, 2001).

Os aços inoxidáveis austeníticos basicamente são compostos por ligas de Fe-Cr-Ni com possibilidade de substituição parcial ou total do níquel por manganês e nitrogênio. Em sua composição química apresentam entre 16 e 30% de cromo, entre 6 e 26% de níquel e menos de 0,3% de carbono. Com estrutura predominante austenítica não pode ser endurecido por tratamento térmico, apresentando na temperatura ambiente baixo limite de escoamento, alto limite de resistência a tração e elevada ductilidade, sendo utilizados na indústria química, alimentícia e no refino de petróleo pelo fato de possuírem melhor soldabilidade e resistência à corrosão em relação aos outros aços inoxidáveis (MODENESI, 2001).

Os aços inoxidáveis duplex apresentam combinações de ligas entre 18 e 30% de cromo, entre 1,5 e 4,5% de molibdênio, pequenas parcelas de elementos formadores e estabilizantes da austenita como por exemplo 3,5 a 8% de níquel e até 0,35% de nitrogênio, formando assim uma microestrutura uniforme composta por ferrita e austenita. Geralmente são utilizados em equipamentos expostos a água do mar, trocadores de calor, indústria de papel e celulose, por apresentarem elevada resistência mecânica, resistência a corrosão e alta soldabilidade (MODENESI, 2001).

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são caracterizados por apresentarem após o tratamento térmico uma alta resistência a oxidação e corrosão sem perda de propriedades como a ductilidade e a tenacidade. O endurecimento desse aço é formado pela presença de martensita ou por precipitação, a qual surge quando são adicionados elementos de liga como cobre, titânio, nióbio e alumínio (AWS, 1998).

2.3.2 Aços inoxidáveis ferríticos

O aço inoxidável ferrítico na temperatura ambiente é composto por uma estrutura simples denominada matriz de ferrita (α), a qual é formada por uma solução sólida de cromo e outros elementos de liga em ferro, constituindo uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado. Esta fase pode apresentar uma quantidade muito pequena de carbono e nitrogênio em sua solução, ocasionando a formação de carbonetos e nitretos. Os teores de cromo nessas ligas são responsáveis por proporcionarem a resistência a corrosão, oxidação e baixo coeficiente de expansão térmica (LULA, 1989).

Lippold e Kotecki (2005 apud LUZ, 2009) classificam os aços inoxidáveis ferríticos em três gerações:

- a primeira geração de ferríticos apresenta cromo em sua composição exclusivamente como agente estabilizador da ferrita. Este grupo é caracterizado pelos aços que contém entre 16 e 18% de cromo e teor de carbono inferior a 0,12%. Com a evolução desta liga foi possível obter aços com teor inferior a 0,05% de carbono;
- a segunda geração possui teor de cromo inferior a primeira geração, no entanto apresenta outros elementos que também atuam na estabilização da ferrita. Este grupo é caracterizado pelos aços que contém entre 10,5% e 11,7% de cromo e teor de carbono inferior a 0,08%, enquanto a adição de titânio pode ser de até 0,75%, porém com a evolução das técnicas de fabricação dos aços, menores são as quantidades necessárias de elementos estabilizantes da ferrita, o que proporciona uma melhor soldabilidade, estampabilidade e qualidade superficial do aço;
- a terceira geração é caracterizada pela redução dos teores de carbono e nitrogênio através das novas técnicas de fabricação. Este grupo é composto por aços que apresentam teor de carbono entre 0,01 e 0,03%, além da adição de elementos como titânio nióbio e molibdênio, que são capazes de estabilizar e melhorar a resistência a corrosão da liga.

2.3.2.1 Microestrutura da região soldada

A microestrutura dos aços inoxidáveis ferríticos está dividida em aços parcialmente transformáveis, os quais são considerados não estabilizados e apresentam elementos intersticiais suficientes para formação de austenita e ferrita quando submetidos a altas

temperaturas, e em aços não transformáveis, caracterizados por conter teor elevado de cromo, baixa quantidade de elementos intersticiais e uma combinação no balanço entre elementos alfa e gama propiciando que a austenita não se forme em temperatura elevada (MODENESI, 2001).

Também define que os aços parcialmente transformáveis possuem três regiões em relação a região soldada: a região bifásica, a região de crescimento de grão e a região de zona fundida. A região bifásica corresponde a porção da zona afetada pelo calor, a qual foi aquecida até a formação de austenita e ferrita. A austenita se forma principalmente nos contornos de grão da ferrita, e após o resfriamento da soldagem acaba se transformando em martensita.

A região de crescimento de grão está diretamente ligada a parte da ZAC que foi aquecida acima do limite de formação da austenita e ferrita impactando no crescimento intenso dos grãos além da dissolução e posterior reprecipitação dos carbonetos e nitretos presentes no aço. Durante o afastamento da poça de fusão ocorre o resfriamento da ZAC e esta região passa por um campo bifásico proporcionando a formação de austenita nos contornos de grãos. A temperaturas mais baixas a austenita pode vir a se transformar em martensita.

Na região da zona fundida que ao apresentar composição química igual à do metal base, apresentará uma estrutura semelhante à da região de crescimento de grão porém apresentando grãos colunares.

De uma maneira geral a solda do aço inox ferrítico é caracterizada por uma estrutura de granulação grosseira, apresentando uma rede de martensita junto aos contornos de grão e precipitados finos de carbonetos e nitretos nos contornos e no interior do grão (MODENESI, 2001). A figura 2.3 ilustra a microestrutura de um aço inox ferrítico soldado não estabilizado.

Figura 2.3 – Microestrutura de solda de um aço inox ferrítico



Fonte: adaptado Modenesi (2001).

2.3.2.2 Soldabilidade do aço inox ferrítico

Por muito tempo a utilização do aço inoxidável ferrítico em estruturas soldadas foi considerado limitada, devido aos problemas de soldabilidade que o mesmo pode proporcionar. De acordo com Lee, Kim e Ahn (1999), os aços inoxidáveis ferríticos apresentam uma baixa soldabilidade, já que a região de solda é caracterizada por baixa ductilidade e tenacidade, sensibilidade a corrosão intergranular e possivelmente trincas de solidificação na zona fundida.

A soldabilidade dos aços inoxidáveis está diretamente ligada ao tipo de microestrutura do aço inox, sendo que cada grupo pode apresentar alguns tipos de problemas de soldagem, tanto metalúrgicas como através de descontinuidades introduzidas no cordão de solda. O quadro 2.2 contempla alguns problemas de soldabilidade metalúrgica que cada tipo de aço inox pode sofrer, além de uma possível solução para evitar que o defeito ocorra (ACESITA, 2006).

Quadro 2.2 – Problemas de soldabilidade dos aços inox.

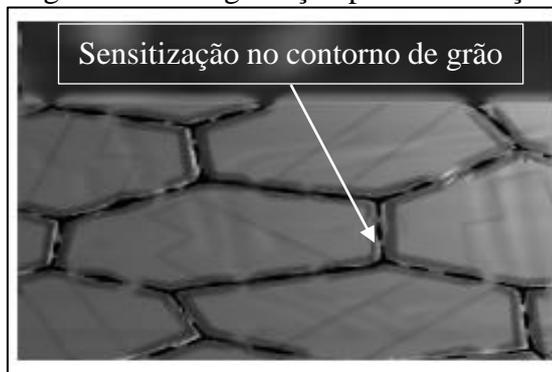
Tipo de Aço Inox	Problema	Solução
Ferrítico	Sensitização	material adequado (estabilizado ao titânio ou ao nióbio); reduzir a energia de soldagem.
	Fragilização por hidrogênio	utilizar procedimento que introduzam pouco hidrogênio durante a soldagem.
	Crescimento grão	procedimento com energia de soldagem menor possível
Austenítico	Sensitização	material adequado (baixo carbono ou estabilizado ao titânio ou nióbio); reduzir a energia de soldagem.
	Trincas a quente (trica de solidificação, liquação e reaquecimento)	utilizar aço com teor baixo de enxofre e fósforo; utilizar metais de adição que gerem um teor de ferrita ao redor de 8% no cordão de solda; modificar a geometria da junta para reduzir tensões introduzidas durante a soldagem.
Martensítico	Fragilização por hidrogênio	utilizar procedimento que introduzam pouco hidrogênio durante a soldagem; utilizar técnicas que reduzam a velocidade de resfriamento da junta (pré-aquecimento, pós-aquecimento).

Fonte: adaptado de Acesita (2006).

2.3.2.3 Sensitização

Sensitização é um problema caracterizado por um ataque localizado nos contornos de grãos principalmente devido a precipitação de carbonetos de cromo. Caso esta região apresente um empobrecimento do grão abaixo de 11% no teor de cromo é submetido a corrosão. A sensitização ocorre quando o material fica exposto a uma faixa de temperatura de 400 a 600°C favorecendo a precipitação de carbonetos (ACESITA, 2006). A figura 2.4 representa o problema de sensitização.

Figura 2.4 – Fragilização por sensitização



Fonte: adaptado de Acesita (2006).

2.3.2.4 Fragilização por hidrogênio

Essa fragilização é caracterizada pela ocorrência de trincas e considerada perigosa devido ao fato das trincas poderem surgir até uma semana após a soldagem. Pode ser proporcionada pelas tensões do material e presença de hidrogênio, ocorrendo principalmente na ZAC quando esta for submetida a temperaturas inferiores a 400°C ou devido a especificação errada do consumível, projeto da junta inadequado além do procedimento de soldagem incorreto (ACESITA, 2006). A fragilização por hidrogênio é apresentada na figura 2.5.

Figura 2.5 – Fragilização por hidrogênio



Fonte: adaptado de Acesita (2006).

2.3.2.5 Fragilização pelo crescimento de grão

O crescimento de grão é o principal mecanismo de fragilização dos aços ferríticos durante o processo de soldagem. Mesmo que esses aços não apresentem variação da microestrutura desde a temperatura inicial até a região de fusão, podem apresentar em altas temperaturas um crescimento irreversível dos grãos na zona afetada pelo calor e na zona fundida. Esta fragilização ocorre em temperaturas acima de 1100°C podendo ocasionar trincas na região soldada, uma vez que o crescimento do grão aumenta a temperatura de transição dúctil-frágil formando uma junta altamente frágil (BARBOSA, 2007).

2.3.2.6 Consumíveis de soldagem

Tecnicamente os aços inoxidáveis ferríticos podem ser considerados mais complexos para serem soldados em relação a aços inox austeníticos e aços de baixo carbono. Desta forma, para cada tipo de aço, um tipo de consumível deve ser selecionado afim de garantir a microestrutura e propriedades mecânicas como também a composição química adequada da região de união dos materiais através do processo de soldagem. As principais diferenças nas propriedades estão relacionadas a menor temperatura de fusão, menor condutividade térmica, maior coeficiente de expansão térmica e maior resistência elétrica (MODENESI, 2001).

A região de solda dos aços inoxidáveis ferríticos apresentam muitos problemas com as perdas de ductilidade, tenacidade e resistência a corrosão em virtude da formação de uma microestrutura com granulação grosseira e martensítica, além da precipitação de carbonetos e nitretos. Para evitar estes tipos de problemas existe a possibilidade de utilização de um metal de adição austenítico ou ainda aços inox ferríticos com baixo teor de elementos intersticiais ($\%C + \%N < 0,03\%$) e adições de nióbio e titânio (MODENESI, 2001).

Com base nas normas da Sociedade Americana de Solda (AWS), Modenesi (2001) apresenta os principais arames de solda para a aplicação em aços e juntas dissimilares que possuam estrutura dos aços inoxidáveis ferríticos:

- ER307 (21% Cr, 9,5% Ni, 4% Mn e 1% Mo): este consumível é utilizado principalmente para a obtenção de soldas de resistência mecânica moderada e elevada resistência a fissuração entre aços dissimilares como por exemplo o aço austenítico ao manganês e aços carbono;
- ER308 (21% Cr e 13% Ni): este metal de adição é preferencialmente utilizado para soldagem de juntas que apresentem uma composição idêntica. Para aplicações onde

deseja-se garantir uma alta resistência mecânica combinada a temperaturas elevadas é recomendado a utilização de arames com maior teor de carbono representados pela sigla “H”. Os arames de baixo teor de carbono (L), são aplicados para processos que exigem uma melhor resistência a corrosão intergranular, enquanto os consumíveis com maior teor de silício (Si) facilitam a fluidez da poça de fusão reduzindo a dificuldades de soldagem com o processo GMAW. Este tipo de arame pode apresentar também variações como LSi e LMo, onde o segundo apresenta teor de molibdênio mais elevado;

- ER309 (24% Cr e 13% Ni): este consumível é muito utilizado na união de metais base de composição similar na condição trabalhada ou fundida. Pode ser utilizado para processos que exijam materiais com maiores teores de liga e na soldagem de juntas dissimilares como aço carbono e aço inox. Este metal de adição apresenta variações de alto teor de molibdênio (Mo), L, Si, LSi e LMo;
- ER409 (12% Cr com adições de Ti): este arame de solda possui estrutura martensítica similar ao arame 410, entretanto a presença de titânio influencia em uma maior resistência a corrosão e maior resistência mecânica já que garante uma estrutura ferrítica para o material. É muito utilizado para a soldagem de materiais similares e dissimilares;
- ER410 (12% Cr): este metal de adição é considerado um aço inoxidável martensítico endurecível ao ar exigindo na maioria das aplicações o uso de pré e pós-aquecimento na soldagem. Muito utilizado da união de materiais similares e em aços ao carbono com o intuito de criar uma camada de material com resistência ao desgaste e à corrosão.

2.3.3 Diagramas de Schaeffler e De Long

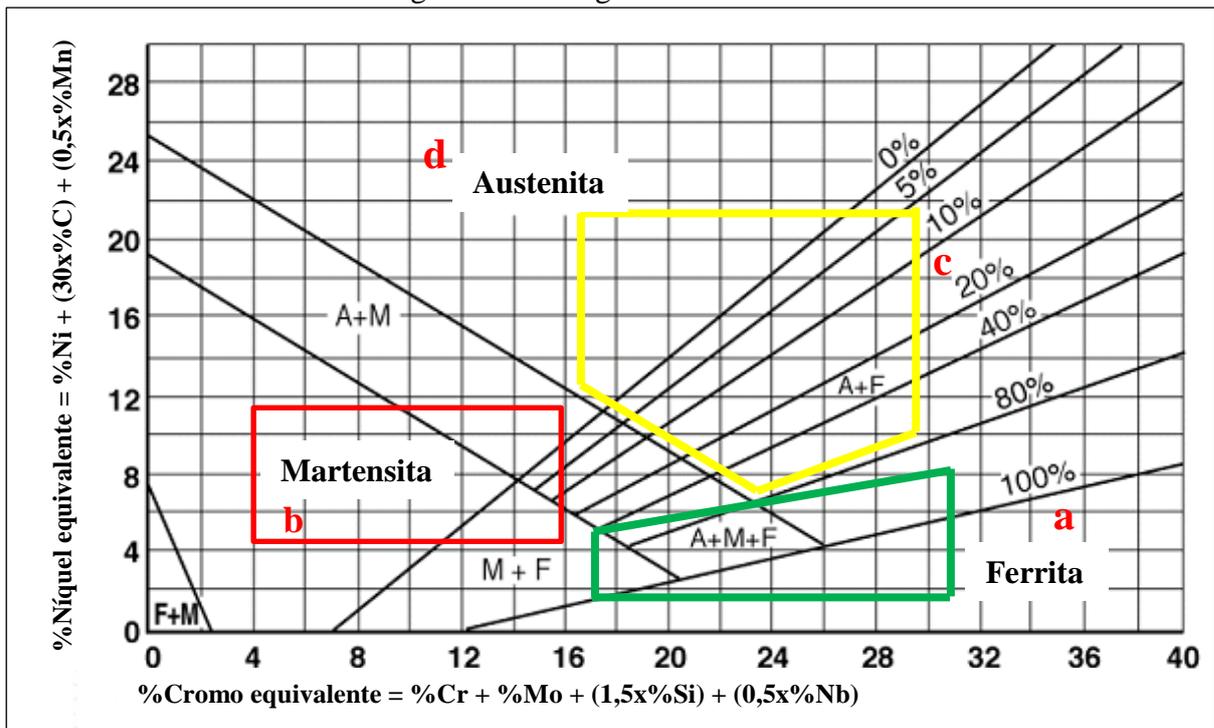
O diagrama de Schaeffler é considerado o método mais importante para avaliação do depósito de solda em aços inoxidáveis, pois permite estimar com antecedência a composição química e a estrutura através dos teores equivalentes de níquel e cromo. Também é muito utilizado para escolher o tipo de consumível para o processo de soldagem (QUITES, 1990). As Equações 1 e 2, apresentadas abaixo, são utilizadas no diagrama de Schaeffler para o cálculo dos equivalentes de cromo e níquel respectivamente:

$$Cr(eq) = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb \quad (eq. 1)$$

$$Ni(eq) = \%Ni + 30\%C + 0,5 \%Mn \quad (eq.2)$$

A figura 2.6 ilustra o diagrama Schaffler, a qual apresenta quatro regiões de fragilização.

Figura 2.6 – Diagrama de Schaffler



Fonte: adaptado de Bermejo (2012).

onde:

- Região de crescimento de grão na ZAC acima de 1150 °C;
- Trinca a frio induzida por hidrogênio;
- Precipitação de fase sigma entre 600 e 950°C;
- Trinca de solidificação e liquação.

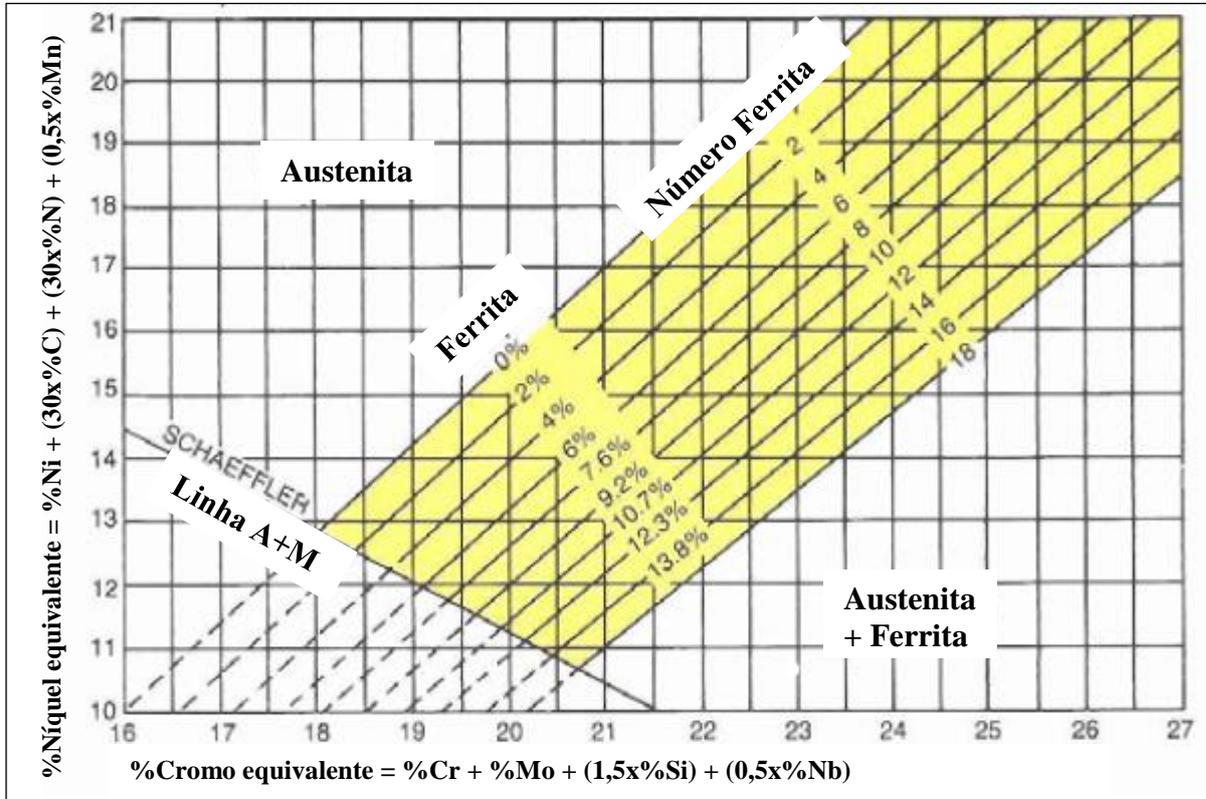
No entanto durante a década de 70, o diagrama de Schaeffler foi corrigido para considerar a presença de nitrogênio no teor de níquel equivalente e desta forma De Long modificou os critérios desenvolvidos por Schaeffler para acrescentar a importante influência do nitrogênio. A figura 2.7 ilustra o diagrama de De Long.

Para a utilização do diagrama de De Long é necessário calcular o cromo e níquel equivalente dos materiais que serão usados, através das Equações 3 e 4:

$$Cr(eq) = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb \quad (eq.3)$$

$$Ni(eq) = \%Ni + 30 \%C + 30\%N + 0,5 \%Mn \quad (eq. 4)$$

Figura 2.7 – Diagrama de De Long



Fonte: adaptado de Bermejo (2012).

Na aplicação de juntas dissimilares com aplicação de consumíveis de composição diferente do metal de base pode-se prever antecipadamente os problemas que poderão ocorrer na junta soldada, facilitando assim a possibilidade de evitá-los.

Para a utilização dos diagramas de Schaeffler e De Long se faz necessário a realização dos cálculos do cromo e níquel equivalente através da composição química da solda e desta forma a microestrutura é determinada pela leitura direta no diagrama onde ocorre a intersecção dos pontos de cromo e níquel equivalente. Em situações onde as composições do metal base é diferente do metal de adição, deve-se calcular os equivalentes para cada material, plotar no diagrama os dois pontos resultantes formados, traçar uma reta entre esses mesmos dois pontos, onde a região da solda estará acima deste segmento de reta dependendo da diluição do processo de soldagem (BERMEJO, 2012).

2.3.4 Aço carbono

O aço carbono é caracterizado por uma combinação entre uma liga de ferro e carbono,

apresentando em sua composição química elementos como silício, manganês, fósforo e cobre. São classificados de acordo com a quantidade de teor de carbono em: aços de baixo carbono quando o teor de carbono é inferior a 0,30%, aços de médio carbono quando o teor carbono está situado entre 0,30% e 0,45% e aços de alto carbono compreendidos entre 0,45% e 1,70% de teor de carbono (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

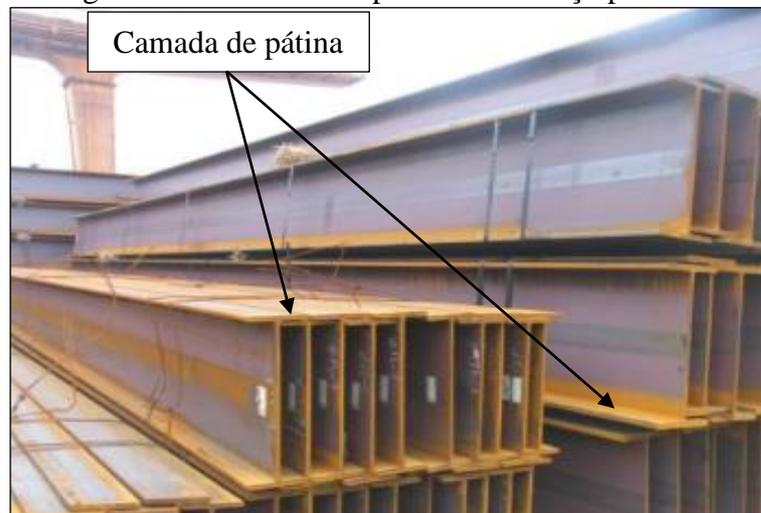
O aço de baixo carbono também chamado “aço doce” é classificado em aço efervescente, aço semi-acalmado e aço acalmado segundo as condições de desoxidação e o modo de solidificação. A soldabilidade deste aço é afetado devido a sensibilidade a fraturas provenientes da soldagem e da resistência a propagação de trincas, a qual pode ser minimizada diminuindo o teor de carbono e aumentando o teor de manganês, fazendo com que a temperatura de transição diminua (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

2.3.5 Aço patinável

Os aços patináveis são caracterizados por não necessitarem do emprego de revestimento metálico ou pintura para ocorrer a proteção a corrosão atmosférica, pois apresentam alta resistência a corrosão, sendo considerado um aço de baixa liga e alta resistência mecânica devido a adição de elementos de liga tais como níquel, cromo e silício.

Este aço pode desenvolver uma película de óxidos aderentes e protetoras de cor laranja, diferente da oxidação comum, chamada pátina, a qual é responsável pela redução da velocidade de corrosão do aço quando o mesmo é exposto a fatores climáticos e níveis de poluição. A figura 2.8 ilustra a camada de pátina em um aço patinável (PANONNI, 2012).

Figura 2.8 – Camada de pátina em um aço patinável



Fonte: adaptado de Panonni (2012).

2.3.6 Soldabilidade do aço patinável

O aço patinável pode ser facilmente soldado, sendo comparado aos aços estruturais convencionais, entretanto por se tratar de um material resistente a corrosão deve se usar um metal de adição que apresente as mesmas composições químicas.

A fissuração pelo hidrogênio é um dos maiores problemas encontrados na soldagem de aços de baixa liga e alta resistência podendo ser perceptível apenas 48 horas após o processo de soldagem. Isso ocorre devido a absorção de hidrogênio durante o processo de soldagem, o qual é facilmente diluído na poça de fusão já que apresenta uma solubilidade maior no metal líquido do que no metal sólido. Durante o resfriamento, uma parte do hidrogênio é liberado por difusão da zona fundida para a atmosfera, mas outra parte difunde para a zona afetada pelo calor. O hidrogênio concentrado na ZAC difunde para descontinuidades na rede enfraquecendo as ligações metálicas e assim podendo iniciar uma trinca, a qual se propaga e leva a fissuração da junta soldada (FARIA, 2010).

2.4 CARBONO EQUIVALENTE

O carbono equivalente (Ceq) é um parâmetro numérico que pode ser utilizado na soldagem para avaliar o potencial de destruição da composição química de uma liga, sobre os aspectos de soldabilidade do componente, estimando a probabilidade de formação de trinca induzida por hidrogênio e a tendência da região soldada formar martensita (MODENESI, 2011).

O carbono equivalente (Ceq) pode ser obtido através da Equação 5:

$$Ceq = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad (eq. 5)$$

O quadro 2.3 mostra a condição de soldabilidade para os valores calculados do carbono equivalente.

Quadro 2.3 – Condição de soldabilidade para %Ceq.

Percentual Carbono Equivalente	Condição de Soldabilidade
$Ceq < 0,40$	Alta soldabilidade
$0,40 \leq Ceq \leq 0,60$	Média soldabilidade
$Ceq \geq 0,60$	Baixa soldabilidade

Fonte: Modenesi (2011)

2.5 SOLDAGEM DE JUNTAS DISSIMILARES

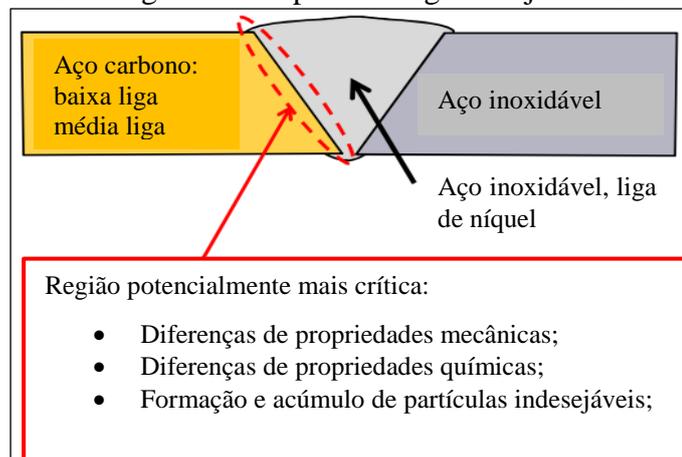
As juntas dissimilares são caracterizadas por apresentarem metais de diferentes composições químicas ou ligas metalurgicamente diferentes. A união de aço carbono e aço inoxidável pode ser citada como um exemplo já que compreende um ou mais metais de base e adição (BAESLACK; LIPPOLD; SAVAGE, 1979).

Este tipo de união é muito utilizado para processos que necessitam de revestimento para resistência a corrosão e união do metal base que apresenta grande diferença de composição química. Os aços ao carbono são facilmente soldados com consumíveis de aço inoxidável austenítico e ligas de níquel por possuírem alto teor de elementos de liga, de maneira a contribuir na acomodação da diluição do carbono proveniente do metal base, reduzindo a susceptibilidade de ocorrência de uma estrutura sensível à nucleação e propagação de trincas (FOLKHARD, 1988).

Lundin (1982) explica que a vida útil de uma junta dissimilar é alterada pela migração do carbono através da interface de solda. Este movimento do carbono é responsável por causar perda de resistência mecânica no metal base ferrítico adjacente a linha de fusão e um aumento na dureza no metal depositado.

Doody (1992) afirma que juntas dissimilares entre aços ao carbono e inoxidáveis apresentam um aspecto microestrutural que podem afetar adversamente a resistência à corrosão sob tensão em trincas em função dos sulfetos de ferro. Já Feldstein (1993) observou que o metal de adição deve ter propriedades mecânicas e de corrosão no mínimo igual ao do metal base de menor resistência da junta. A figura 2.9 ilustra a região e os defeitos críticos que podem surgir na soldagem de juntas dissimilares.

Figura 2.9 – Região crítica para soldagem de juntas dissimilares



Fonte: adaptado de Modenesi (2001).

2.6 DILUIÇÃO

Doddy (1992) define diluição como uma alteração na composição do metal de adição depositado por soldagem causada pela mistura com o metal base sendo considerada como o percentual de metal base contido no metal de solda. É de grande importância quando há necessidade de se estimar a composição química de uma solda de materiais dissimilares.

Para Baully (2000), o controle da diluição é de grande importância para a soldagem de metais dissimilares na deposição de revestimentos especiais sobre uma superfície metálica e na soldagem de metais com composições químicas que apresentam altos teores de elementos como o carbono e o enxofre, os quais prejudicam a zona fundida.

2.7 CUSTOS DO PROCESSO DE SOLDAGEM

O custo de soldagem é considerado muito importante quando se deseja conhecer o preço do final do produto a ser fabricado, para assim ser possível estimar uma margem de lucratividade. O custo total do produto depende de vários fatores, os quais estão representados na Equação 6:

$$CT = C1 + C2 + C3 + C4 + C5 + C6 + C7 + C8 \quad (eq. 6)$$

onde:

C1 é o custo do metal de adição a utilizar;

C2 é o custo de energia elétrica a ser consumida;

C3 é o custo da mão de obra envolvida;

C4 é o custo da manutenção do equipamento;

C5 é o custo da depreciação do equipamento;

C6 é o custo dos produtos protetores tipo anti-respingos;

C7 é o custo do material de proteção (luvas, máscaras);

C8 é o custo do material consumível (bicos e bocais).

O custo do metal de adição (C1) é dado pelo produto da quantidade de solda na junta pelo preço do metal de adição a ser consumido. Para se calcular o custo da energia elétrica (C2), e necessário realizar a multiplicação entre a potência de saída do equipamento de solda, o tempo real de soldagem e o preço da energia, dividindo estes pela eficiência do equipamento. Já o

custo da mão de obra (C3), pode ser calculado pelo somatório do custo da mão de obra e dos encargos sociais, multiplicando pelo tempo de soldagem. Por fim, custos de manutenção (C4) e depreciação (C5), podem ser calculados pela divisão da despesa mensal de manutenção e depreciação, sobre a produção mensal. Os demais custos, (C6, C7, C8) podem ser facilmente calculados através da medição da quantidade utilizada multiplicada pelo preço unitário (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Em termos gerais os fatores que mais influenciam no produto final estão relacionados ao custo de mão de obra e o custo com consumíveis (MARQUES; MODENESI; BRACARENCE, 2006).

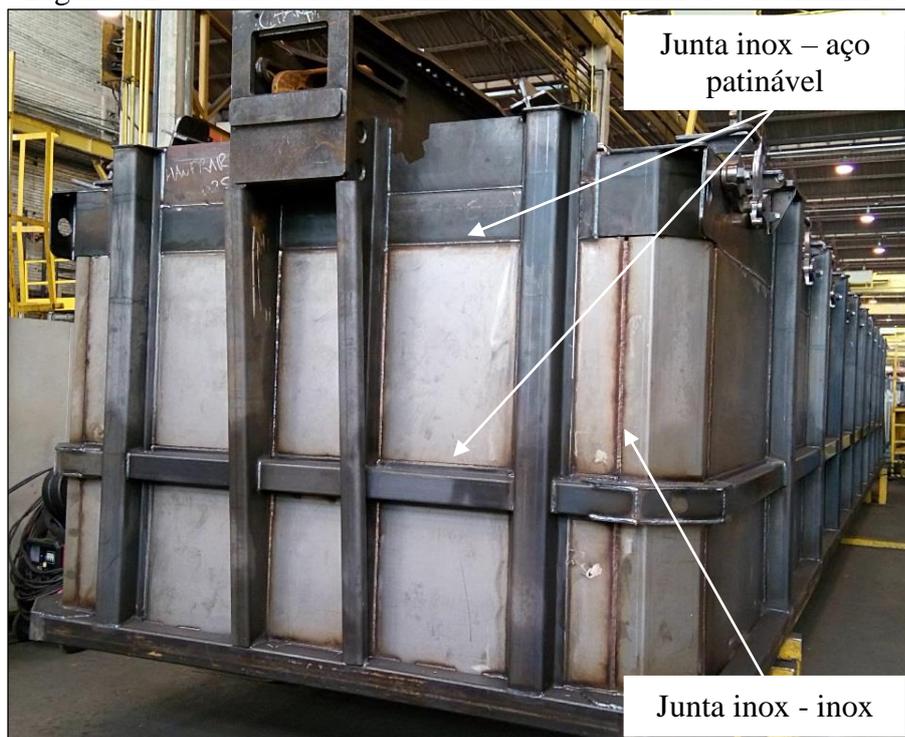
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os materiais e a metodologia aplicada a fim de comparar a qualidade e a resistência mecânica de juntas dissimilares e similares, com a utilização de dois novos tipos de metais de adição, em relação ao atualmente utilizado em aço ASTM A240 e o SAC350 na fabricação de implementos ferroviários.

3.1 PROCESSO ATUAL E MATERIAIS

Dentre os processos para fabricação de implementos ferroviários, a união por soldagem requer um controle e cuidado especial em relação aos problemas de soldabilidade e principalmente na determinação do metal de adição para a soldagem de diferentes tipos de metais base. No processo atual esse tipo de soldagem normalmente é utilizado na união de chapas e tubos na posição plana, horizontal e vertical descendente, principalmente entre o aço SAC 350 e o inox ASTM A240, tendo como principais aplicações a lateral do vagão e a tampa de escoamento, as quais estão constantemente submetidas ao desgaste abrasivo causado pelo transporte e descarga do minério de ferro. A figura 3.1 ilustra as uniões entre materiais similares e dissimilares no vagão ferroviário.

Figura 3.1 – Juntas soldadas entre materiais similares e dissimilares



Fonte: o autor (2016)

A tabela 3.1 apresenta as composições químicas dos principais materiais base utilizado no processo de soldagem do vagão ferroviário.

Tabela 3.1 – Composição química dos aços utilizados

Material	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al	%Cu	%Cr	%Ni	%N	Ceq
SAC 350	0,100	0,810	0,034	0,008	1,088	0,028	0,095	0,217	0,005	0,005	0,280
ASTM A240	0,080	1,000	0,040	0,015	1,000	-	-	11,5-13,5	0,600	-	2,8

Fonte: adaptado de Techno-Alloys (2016).

Atualmente o processo de soldagem é feito através da utilização do arame AWS ER309 LSI com diâmetro de 1,2mm, o qual garante alta soldabilidade e principalmente apresenta boa resistência mecânica, de modo que nenhum problema em relação a soldabilidade tenha aparecido. Este insumo é um dos mais recomendados para a união de juntas dissimilares, entretanto seu valor de aquisição é alto quando comparado a outros arames que podem ser indicados ao processo, o que conseqüentemente eleva muito o preço de fabricação do produto. A tabela 3.2 apresenta a composição química do consumível utilizado atualmente no processo de soldagem.

Tabela 3.2 – Composição química do metal de adição utilizado

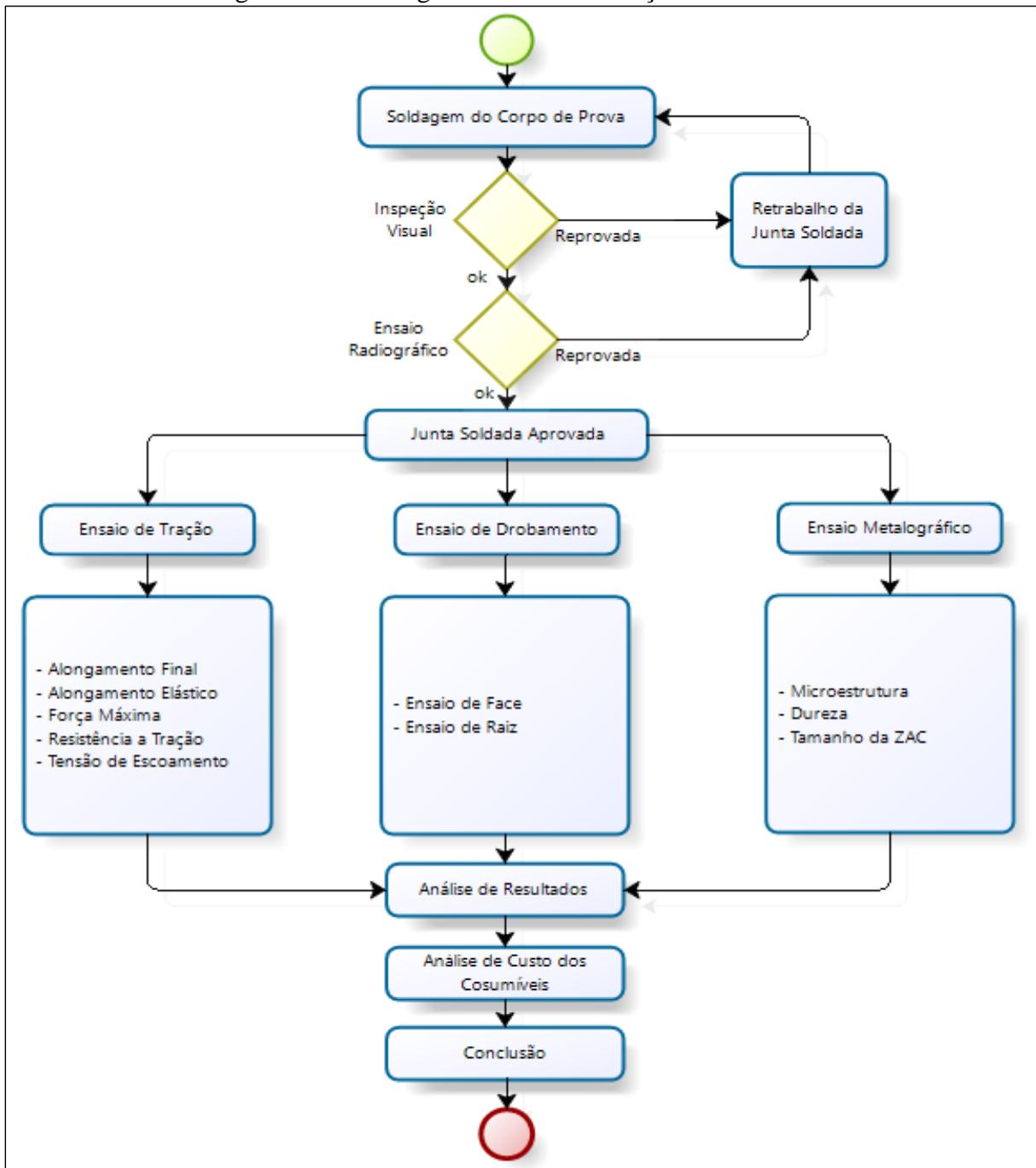
Arame	%C	%Mn	%S	%P	%Si	%Mo	%Cu	%Cr	%Ni
ER 309 LSi	0,030	1,0-2,5	0,030	0,030	0,65-1,0	0,750	0,750	23,0-25,0	12,0-14,0

Fonte: adaptado de Techno-Alloys (2016).

Os parâmetros atuais utilizados na soldagem destes itens são descritos no Anexo A e B respectivamente, através das especificações do processo de soldagem, EPS 108, para o processo de soldagem entre aços inoxidáveis ferríticos e aços resistentes a corrosão atmosférica em geral e EPS 111, para a soldagem de chapas de aço inoxidável ferrítico, onde quase todos os processos são executados de forma semiautomática pelo processo GMAW. Nestas especificações de processos são apresentados os parâmetros de soldagem, o tipo de processo, posição, gás de proteção e metal de adição para cada tipo de junta soldada.

Com o intuito de apresentar o trabalho experimental, os itens que seguem demonstraram uma sequência das etapas de desenvolvimento deste estudo, de acordo com a ordem de execução que as amostras foram submetidas para que o processo fosse similar a soldagem do implemento ferroviário do modelo gôndola. A figura 3.2 ilustra todo o desenvolvimento das técnicas experimentais utilizadas para caracterização das amostras, especificando qual a finalidade de cada ensaio.

Figura 3.2 – Fluxograma de caracterização das amostras



Fonte: o autor (2016)

O experimento buscou apresentar alternativas mais viáveis para reduzir o custo do processo de soldagem realizando testes práticos em corpos de provas que simulem o processo real de fabricação do implemento ferroviário.

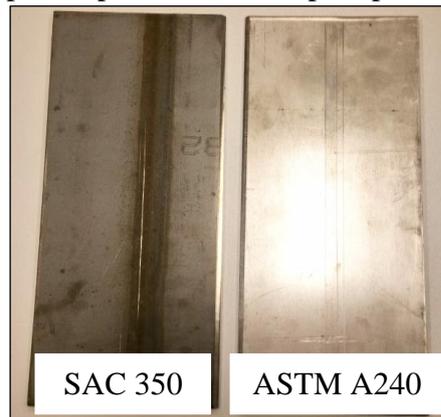
Para fabricar os corpos de prova, o trabalho baseou-se na análise da demanda dos aços e consumíveis utilizados na fabricação do vagão ferroviário. A partir desta análise, os materiais escolhidos para os testes foram chapas com 4,75 mm de espessuras em aço ASTM A240 e SAC350.

3.2 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nos testes, foram cortados com a finalidade de simular os processos de fabricação da Randon, buscando qualificar um novo consumível de soldagem. Foram preparadas seis amostras, objetivando a escolha do melhor arame para as juntas dissimilares e similares.

Os corpos de prova de simulação das juntas de topo dissimilares e similares, foram cortados em processo de guilhotina em tamanho padrão de 300 mm x 150 mm, na espessura de 4,75 mm com chanfro de 45° (SAC 350 e ASTM A240), como mostra a figura 3.3. Posteriormente foi retirado de cada amostra soldada, quatro corpos de prova para o ensaio de tração e dois para o ensaio de dobramento conforme norma ASME IX. A figura 3.4 ilustra as juntas soldadas.

Figura 3.3 – Corpos de provas cortados pelo processo de guilhotina.



Fonte: o autor (2016)

Figura 3.4 – Juntas soldadas dissimilar e similar



Fonte: o autor (2016)

3.2.1 Processo de soldagem utilizado para a fabricação dos corpos de prova

Todos os corpos de provas de juntas similares e dissimilares, foram realizados pela deposição de cordões sobre chapas na posição plana em bancada do laboratório de solda disponibilizada pela Randon Implementos de forma manual. O processo de soldagem GMAW foi realizado utilizando uma fonte de soldagem Sumig modelo Falcon 500, conforme é ilustrada na figura 3.5.

Figura 3.5 – Máquina de solda utilizada no processo de soldagem.



Fonte: o autor (2016)

As condições paramétricas utilizadas no andamento dos testes, foram definidos com o intuito de proporcionar o máximo a similaridade com o processo de fabricação do vagão atual, obedecendo os padrões de qualidade e as especificações de solda.

Os parâmetros de solda foram mantidos igualmente para todos os seis ensaios realizados, de forma a inibir qualquer influência que o mesmo poderia ocasionar, já que o intuito era qualificar outros dois modelos diferentes de consumível. Os principais parâmetros medidos foram:

- a) corrente da fonte a arco elétrico MIG/MAG;
- b) tensão da fonte a arco elétrico MIG/MAG
- c) tipo de consumível;
- d) gás utilizado.

A tabela 3.3 apresenta os parâmetros utilizados para a soldagem de todos os corpos de prova:

Tabela 3.3 – Parâmetros de soldagem GMAW

Parâmetros de Soldagem	Soldagem manual
Tensão de Operação	22,4 V
Corrente de Operação	225 A
Gás utilizado	98% Ar e 2% CO ₂
Consumíveis	ER 308LSI / ER 309LSI / ER 410L

Fonte: o autor (2016)

3.2.2 Consumíveis de soldagem

Além do consumível ER 309LSI utilizado atualmente, foram inseridos mais dois tipos de metais de adição para soldagem dos corpos de provas, o ER 308LSI e o ER 410L, os quais são descritos na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Composição química dos metais de adição para realização dos testes

Arame	%C	%Mn	%S	%P	%Si	%Mo	%Cu	%Cr	%Ni
ER 309 LSi	0,030	1,0-2,5	0,030	0,030	0,65-1,0	0,750	0,750	23,0-25,0	12,0-14,0
ER 308 LSi	0,030	1,0-2,5	0,03	0,03	0,65-1,0	0,75	0,75	19,5-22,0	9,0-11,0
ER 410 L	0,120	0,600	0,030	0,030	0,500	0,750	0,750	11,5-13,5	0,600

Fonte: Adaptado de Techno-Alloys (2016).

A tabela 3.5 apresenta os dados referente as propriedades mecânicas dos consumíveis utilizados durante o processo de soldagem dos corpos de prova segundo a AWS A5.9.

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas dos consumíveis

Arame	Alongamento Elástico (%)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)
ER 308 LSi	36	620	370
ER 309 LSi	41	600	440
ER 410 L	15	990	760

Fonte: ESAB (2016)

3.3 ENSAIOS

Os corpos de prova soldados de topo foram comparados com os atuais processos de

fabricação, caracterizando-os de forma visual, radiográfica, tração, dobramento e metalográfico.

3.3.1 Caracterização visual

Os corpos de prova soldados de topo foram caracterizados visualmente, sendo comparados com a soldagem das estruturas do vagão ferroviário modelo gôndola, o qual é atualmente realizado pela empresa através do processo GMAW com arame ER309 LSi de diâmetro 1,2 mm. Este tipo de ensaio foi baseado no anexo C, contemplado pelo procedimento de gestão 115 de qualificação do soldador (documento interno da empresa), onde o orientador de solda verificou a ausência de trincas superficiais, porosidades e mordeduras excessivas.

3.3.2 Ensaio radiográfico

Todos os corpos de prova fabricados para os ensaios, passaram pela inspeção radiográfica, afim de evidenciar qualquer problema de soldagem antes da realização dos testes laboratoriais.

Essa inspeção radiográfica foi realizada por uma empresa prestadora de serviço terceirizada chamada Capaz, internamente na sala de raio X da Randon Implementos, afim de verificar descontinuidades como trincas longitudinais e transversais, falta de fusão e penetração, excesso de penetração, porosidade, inclusão de escória e metálica, concavidade interna e alongada e mordeduras internas e externas, possivelmente encontradas durante o processo de soldagem. Este procedimento foi objetivado conforme norma ASME IX, Artigo I – Requisitos Gerais de Soldagem, QW 191, onde as juntas não podem exceder inclusões de 6mm ou 1/3 da espessura da solda para serem aprovados.

3.3.3 Ensaio de tração

Os corpos de provas aprovados na caracterização visual e radiográfica, foram submetidos ao ensaio de tração realizado na máquina Panatec, Wolpert, mostrada na figura 3.6, apresentando resultados de alongamento elástico e final, resistência a tração e tensão de escoamento. Este mesmo equipamento foi utilizado para a realização dos ensaios de dobramento alterando alguns dispositivos de fixação e utilizando a parte superior da máquina como uma espécie de prensa hidráulica.

Figura 3.6 – Equipamento utilizado para o ensaio de tração e dobramento.



Fonte: o autor (2016)

Para este ensaio, foram preparados 24 corpos de prova cortados conforme representado na figura 3.7 (Norma ASME IX, Artigo I – Requisitos Gerais de Soldagem, QW 151) e ensaiados conforme norma ASME IX, Artigo I – Requisitos Gerais de Soldagem, QW 153, tendo os resultados revelados por um software que fornece um relatório padrão com resultados, dados estatísticos e gráficos.

Figura 3.7 – Corpos de prova preparados para teste de tração

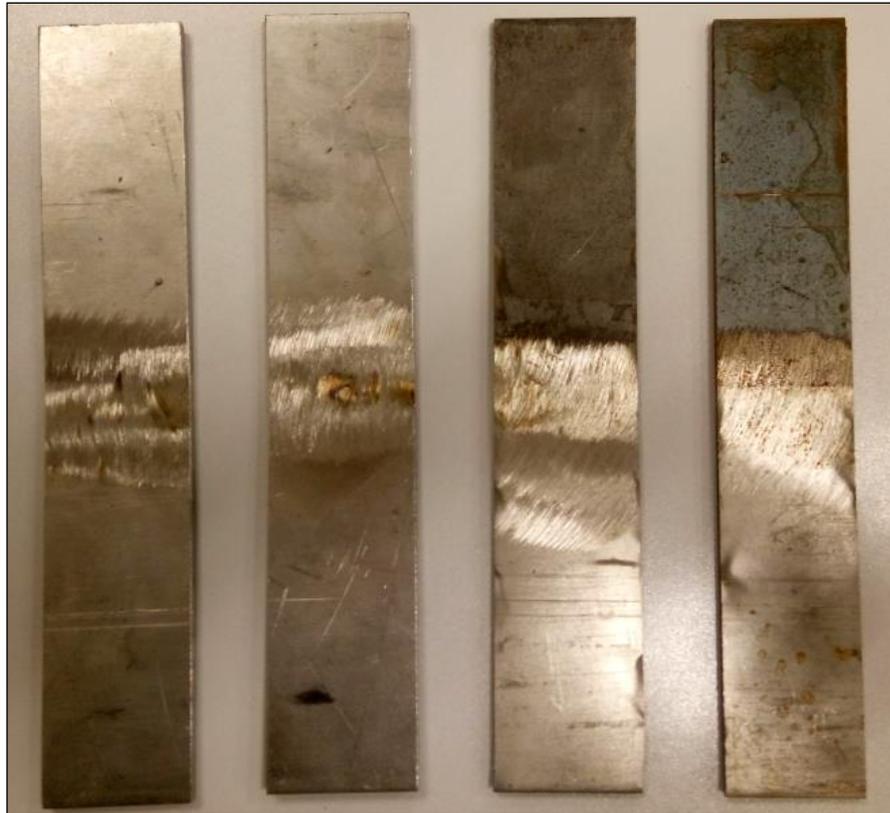


Fonte: o autor (2016)

3.3.4 Ensaio de dobramento guiado

O ensaio de dobramento fundamentou-se em submeter os 12 corpos de prova a uma deformação plástica por flexão no centro da solda, buscando qualificar o procedimento de soldagem de forma qualitativa, realizados na mesma máquina do ensaio de tração. Os corpos de provas foram preparados conforme figura 3.8 (Norma ASME IX, Artigo I – Requisitos Gerais de Soldagem, QW 161), e o raio de cutelo utilizado para o ensaio foi de 8 mm. Para este ensaio foram desconsideradas trincas nas extremidades que fossem inferiores a 3mm ou que a soma das trincas não fosse maior que 3mm conforme norma ASME IX, Artigo I – Requisitos Gerais de Soldagem, QW 163.

Figura 3.8 – Corpos de prova preparados para teste de dobramento



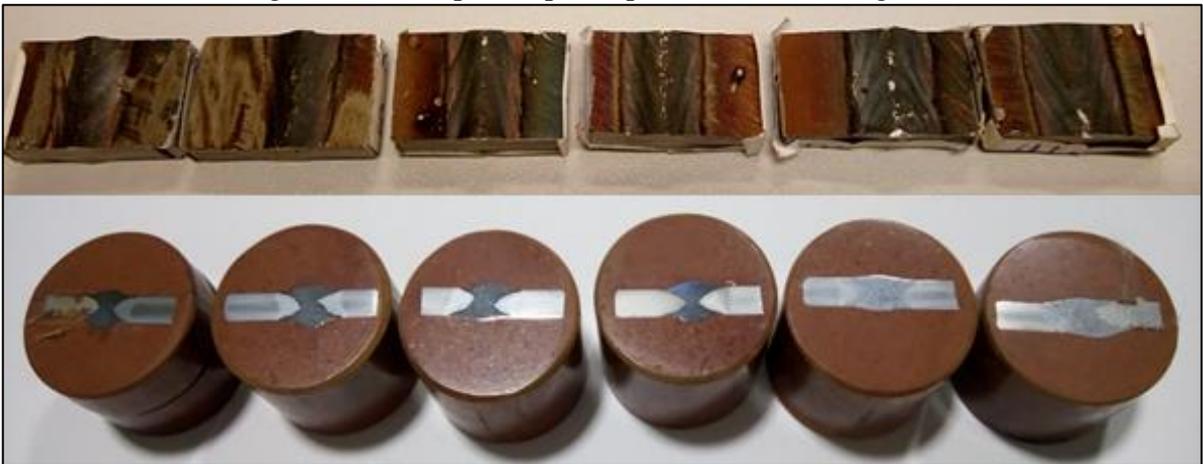
Fonte: o autor (2016)

3.3.5 Ensaio metalográfico

Neste ensaio foram retiradas pequenas amostras de cada uma das seis juntas soldadas anteriormente, com o objetivo de relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação e o seu desempenho em suas funções. Estas seis amostras passaram por um processo de preparação afim de se obter o material para análise.

Primeiramente os corpos de provas foram embutidos a quente através de uma prensa de embutimento com uma resina de baquelite. Após este procedimento os corpos de prova foram submetidos ao lixamento manual, mudando-se de direção do lixamento (0° - 90° - 180° - 270°) e submetendo a amostra a sucessivas lixas de granulometria cada vez menores, com o intuito de remover riscos e marcas da superfície das peças. Por fim, ao realizar o polimento mecânico das superfícies, as mesmas foram submetidas a uma solução química para obter o efeito do polimento desejado. Devido a diferença entre composição química dos metais base, foi necessário dividir o ataque químico das amostras em duas etapas: primeiramente foi feito o ataque químico do aço patinável SAC350 com Nital 2% e posteriormente do inox ASTM A240 com Cl-HNO_3 -ácido acético ou vilela. A figura 3.9 apresenta os corpos de provas cortados e embutidos.

Figura 3.9 – Corpos de prova para análise metalográfica



Fonte: o autor (2016)

Para a realização do ensaio de microdureza os corpos de provas foram montados na posição horizontal com superfície perpendicular ao penetrador, submetidos a uma carga de 0,3 kg (2,94N), através de um micro durômetro. Desta forma foram coletados cinco pontos em cada extremidade do metal de solda (zona afetada pelo calor) incluindo o metal de solda.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos nos testes do processo de soldagem GMAW. Foram avaliados aspectos como análise visual e radiográfica, ensaios de tração e dobramento e ensaios de metalografia. Os resultados obtidos foram utilizados como base para a interpretação da influência do metal de adição na união de juntas em aço inox ASTM A240 e patinável SAC350.

4.1 ANÁLISE VISUAL

Este procedimento foi realizado logo após o término do processo de soldagem, onde o orientador de solda inspecionou os cordões de solda efetuados conforme estabelecido no documento interno da empresa (anexo C).

Após a realização da análise visual todas as seis juntas soldadas apresentaram-se isentas de qualquer tipo de trincas superficiais, porosidades, mordeduras excessivas e falta de preenchimento.

4.2 ANÁLISE RADIOGRÁFICA

Com o intuito de identificar problemas internamente no processo de soldagem dos corpos de prova e impedir que os mesmos prosseguissem nos testes com algum tipo de descontinuidade, todas as seis juntas foram inspecionadas radiograficamente e os resultados são apresentados no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Resultados do ensaio radiográfico

Nº da junta	Tipo da junta / arame	Tipo de descontinuidade	Resultado
1	Inox-SAC350 / ER410L	Porosidade	Aprovado
2	Inox-Inox / ER410L	Porosidade	Aprovado
3	Inox-SAC350 / ER309LSi	-	Aprovado
4	Inox-Inox / ER309LSi	Porosidade	Aprovado
5	Inox-SAC350 / ER308LSi	-	Aprovado
6	Inox-Inox / ER308LSi	-	Aprovado

Fonte: o autor (2016)

O anexo D ilustra o relatório de ensaio radiográfico realizado pela empresa Capaz.

Através desse relatório foi possível identificar algumas discontinuidades causada pela porosidade, as quais foram consideradas insignificativas (já que não excederam inclusões de 6mm ou 1/3 da espessura da solda) e desta forma todos as seis juntas soldadas foram avaliadas como aprovadas.

4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

A tabela 4.1 e 4.2 expõe os resultados obtidos no ensaio de tração realizados no laboratório de qualidade da empresa Randon Implementos. Nestas tabelas estão relacionados os parâmetros de maior relevância para análise do experimento. O relatório completo pode ser consultado no Apêndice A. A tabela 4.1 apresenta os valores referente as juntas similares.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de tração para juntas similares inox-inox

Nº do ensaio	Tipo da junta / arame	Alongamento final (%)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)
1	Inox – Inox / ER 308LSi	12,68	550,84	442,32
2	Inox – Inox / ER 308LSi	12,18	553,09	447,59
3	Inox – Inox / ER 308LSi	11,53	535,79	420,15
4	Inox – Inox / ER 308LSi	13,26	552,11	443,86
5	Inox – Inox / ER 309LSi	14,44	549,27	435,87
6	Inox – Inox / ER 309LSi	10,97	543,39	429,13
7	Inox – Inox / ER 309LSi	8,91	537,01	437,85
8	Inox – Inox / ER 309LSi	10,36	532,79	429,27
9	Inox – Inox / ER 410L	11,14	544,17	431,46
10	Inox – Inox / ER 410L	12,32	548,29	436,4
11	Inox – Inox / ER 410L	11,33	551,24	442,97
12	Inox – Inox / ER 410L	11,61	545,35	438,44

Fonte: o autor (2016)

A tabela 4.2 descreve os dados referente aos limites de resistência a tração e escoamento além do alongamento final dos metais base utilizados durante o processo de soldagem dos corpos de prova.

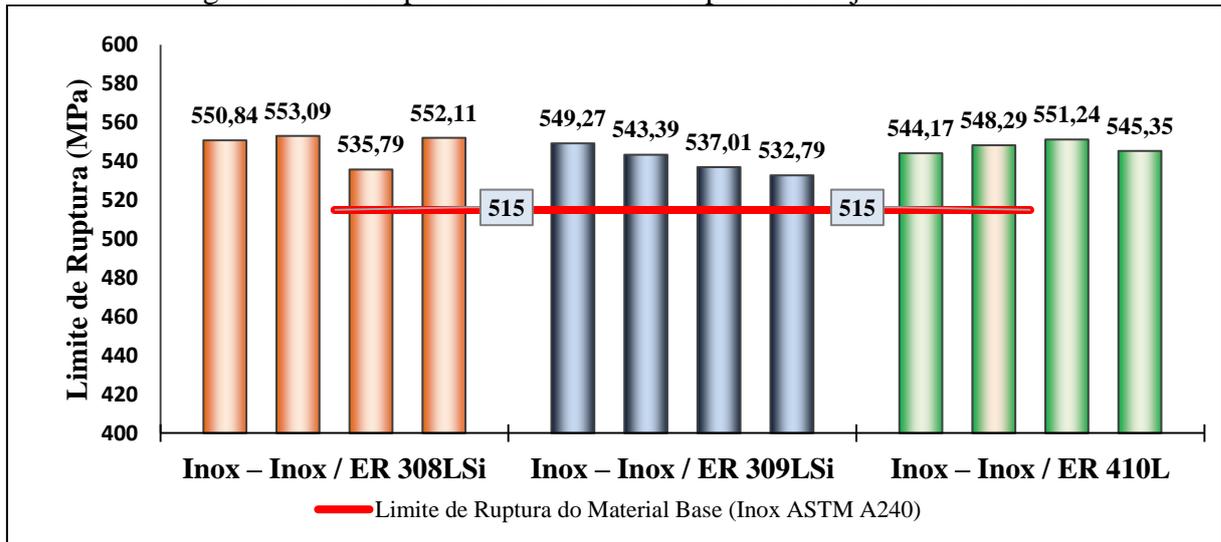
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas dos metais base

Metal base	Alongamento final (%)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)
SAC 350	16	500	350
ASTM A240	20	515	205

Fonte: o autor (2016)

A figura 4.1 ilustra os valores de tensão de ruptura agrupados de acordo com o metal de adição utilizado no processo de soldagem de juntas similares, durante o ensaio de tração. O valor mínimo de tensão de ruptura aceito para que um corpo de prova fosse aprovado no ensaio de tração correspondeu a mínima tensão de ruptura do metal base.

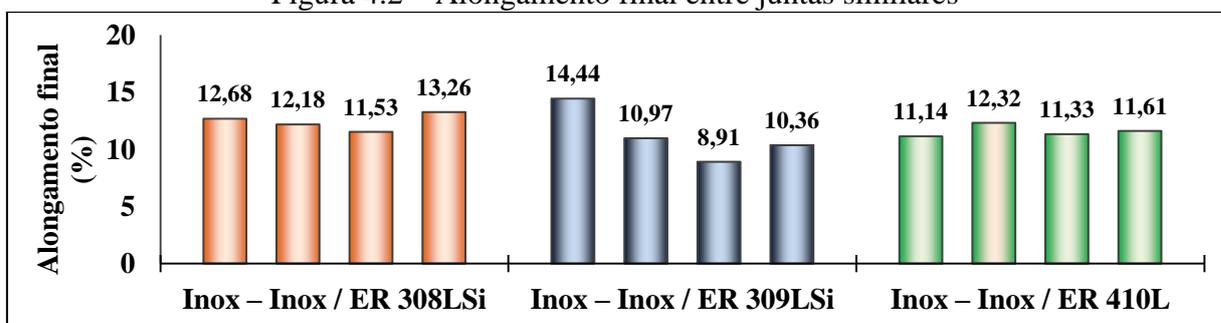
Figura 4.1 – Comparativo do limite de ruptura entre juntas similares



Fonte: o autor (2016)

Na 4.1 foi possível observar que os três metais de adição obtiveram limite de ruptura acima do limite mínimo de ruptura do metal base de 515 MPa. Foi verificado também através da figura 4.2, que o alongamento final apresentou valores semelhantes e já que todos corpos de prova romperam no metal base, não foi possível estimar o metal de adição com maior ductilidade. Por fim, os resultados obtidos durante o ensaio de tração para as juntas soldadas similares, puderam aprovar os três consumíveis utilizados de acordo com a reação dos corpos de prova ao esforço de tração.

Figura 4.2 – Alongamento final entre juntas similares



Fonte: o autor (2016)

A tabela 4.3 descreve os valores obtidos no ensaio de tração dos corpos de prova

formados por juntas soldadas dissimilares (inox-SAC350).

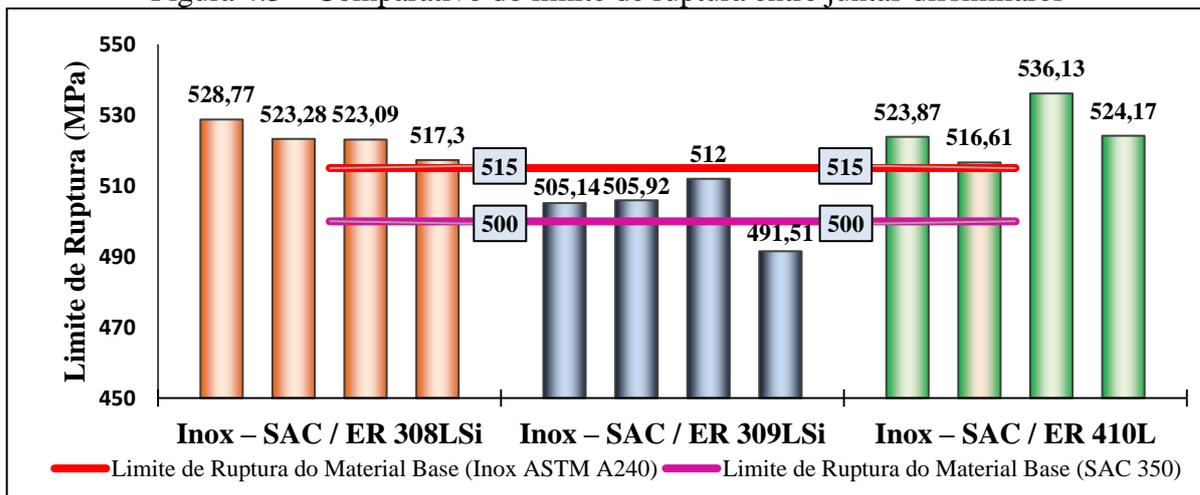
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de tração para juntas dissimilares inox-SAC350

Nº do Ensaio	Tipo da junta / arame	Alongamento final (%)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)
13	Inox-SAC350 / ER 308LSi	16,03	528,77	425,77
14	Inox-SAC350 / ER 308LSi	15,11	523,28	413,85
15	Inox-SAC350 / ER 308LSi	18,80	523,09	415,59
16	Inox-SAC350 / ER 308LSi	17,31	517,3	411,43
17	Inox-SAC350 / ER 309LSi	12,85	505,14	406,36
18	Inox-SAC350 / ER 309LSi	13,69	505,92	396,33
19	Inox-SAC350 / ER 309LSi	13,18	512	415,96
20	Inox-SAC350 / ER 309LSi	13,61	491,51	383,95
21	Inox-SAC350 / ER 410L	13,73	523,87	428,33
22	Inox-SAC350 / ER 410L	11,94	516,61	415,08
23	Inox-SAC350 / ER 410L	12,84	536,13	430,89
24	Inox-SAC350 / ER 410L	13,27	524,17	423,84

Fonte: o autor (2016)

A figura 4.3 explana um gráfico com valores de tensão de ruptura agrupados de acordo com o metal de adição utilizado no processo de soldagem de juntas dissimilares, durante o ensaio de tração. O limite de ruptura mínimo aceito para este ensaio está vinculado ao metal base com menor limite de resistência a ruptura, onde neste caso está representado pelo SAC350.

Figura 4.3 – Comparativo do limite de ruptura entre juntas dissimilares

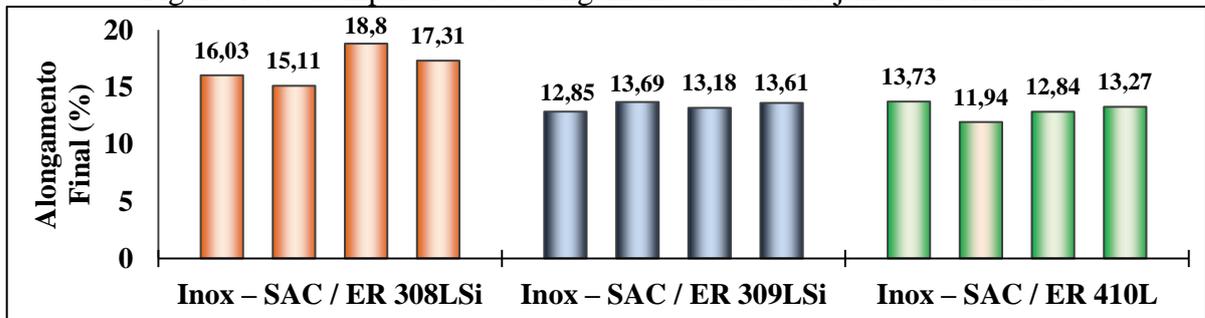


Fonte: o autor (2016)

No ensaio para juntas soldadas dissimilares foi possível observar que os metais de adição ER 308 LSi e ER 410L obtiveram limite de ruptura acima do limite mínimo de ruptura do material base de 500 MPa. O arame ER 309 LSi teve um corpo de prova reprovado por não obter o mínimo limite de resistência a ruptura, entretanto na média dos valores, os ensaios

atenderam o limite especificado. Foi verificado também através da figura 4.4, que o alongamento final apresentou estaticamente valores semelhantes e já que todos corpos de prova romperam no metal base, não foi possível estimar o metal de adição com maior ductilidade. Igualmente como no ensaio para juntas similares, os resultados obtidos durante o ensaio de tração para as juntas soldadas dissimilares, puderam aprovar os três consumíveis utilizados de acordo com o comportamento dos corpos de prova ao esforço de tração. Já uma provável explicação para a diminuição do limite de resistência a ruptura, pode estar relacionada a diferença entre composições químicas dos metais base, o que de fato é explicado por Lundin (1981), afirmando que a vida útil de uma junta dissimilar é alterada pela migração do carbono através da interface de solda, causando assim a redução da resistência mecânica.

Figura 4.4 – Comparativo do alongamento final entre juntas dissimilares



Fonte: o autor (2016)

Todos os 24 testes de tração realizados não romperam na solda efetuada. No ensaio de juntas similares todos os 12 corpos de provas romperam ao lado da junta soldada (ZAC). Entretanto no ensaio das juntas dissimilares 11 corpos romperam ao lado da junta soldada no metal base de menor limite de resistência a tração e um deles (14), rompeu no lado do metal base com maior resistência a tração, provavelmente devido a uma fragilização ocorrida durante o processo de usinagem do mesmo ou a uma inclusão no material.

4.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE DOBRAMENTO GUIADO

O quadro 4.2 exibe o relatório referente ao ensaio de dobramento, onde os corpos de provas foram submetidos a análise qualitativa para o surgimento de trincas e discontinuidades mediante a norma estabelecida pela ASME IX. O ensaio de dobramento foi composto por 12 corpos de provas, onde seis amostras foram submetidas a ensaio de face e os restantes ao ensaio de raiz. Ao final do experimento nenhum dos corpos de prova apresentaram algum tipo de trinca ou discontinuidades, sendo assim todos aprovados.

Quadro 4.2 – Resultados do ensaio de dobramento

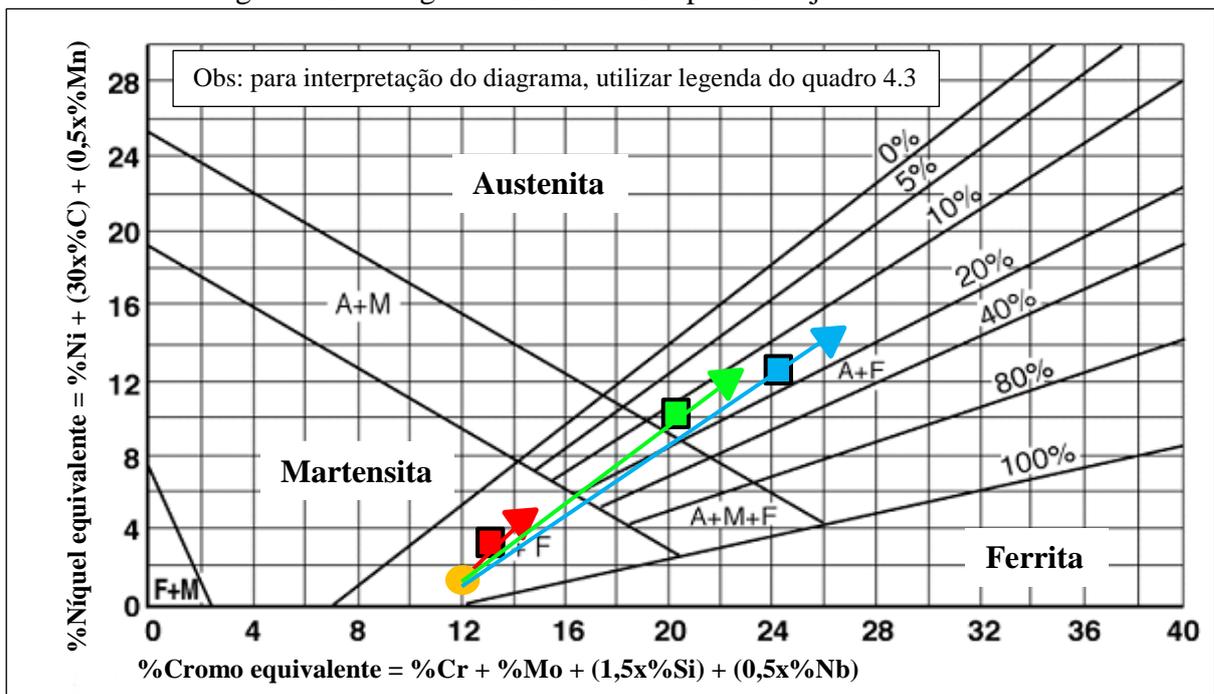
Nº do ensaio	Tipo da junta / arame	Tipo de dobramento	Avaliação	Resultado qualitativo
1	Inox–Inox / ER 308LSi	Face	Não rompeu	Aprovado
2	Inox–Inox / ER 308LSi	Raiz	Não rompeu	Aprovado
3	Inox–Inox / ER 309LSi	Face	Não rompeu	Aprovado
4	Inox–Inox / ER 309LSi	Raiz	Não rompeu	Aprovado
5	Inox–Inox / ER 410L	Face	Não rompeu	Aprovado
6	Inox–Inox / ER 410L	Raiz	Não rompeu	Aprovado
7	Inox–SAC350 / ER 308LSi	Face	Não rompeu	Aprovado
8	Inox–SAC350 / ER 308LSi	Raiz	Não rompeu	Aprovado
9	Inox–SAC350 / ER 309LSi	Face	Não rompeu	Aprovado
10	Inox–SAC350 / ER 309LSi	Raiz	Não rompeu	Aprovado
11	Inox–SAC350 / ER 410L	Face	Não rompeu	Aprovado
12	Inox–SAC350 / ER 410L	Raiz	Não rompeu	Aprovado

Fonte: o autor (2016)

4.5 PREDICÇÃO DA REGIÃO DA SOLDA

Nesta etapa buscou-se identificar o tipo de microestrutura que cada junta soldada iria possuir, através do método teórico do diagrama de Schaffler. A figura 4.5 ilustra o diagrama para as juntas soldadas similares. O quadro 4.3 exemplifica o que cada demarcação significa.

Figura 4.5 – Diagrama de Schaffler aplicado a juntas similares



Fonte: o autor (2016).

O quadro 4.3 apresenta as descrições do diagrama de Schaffler para juntas similares e dissimilares.

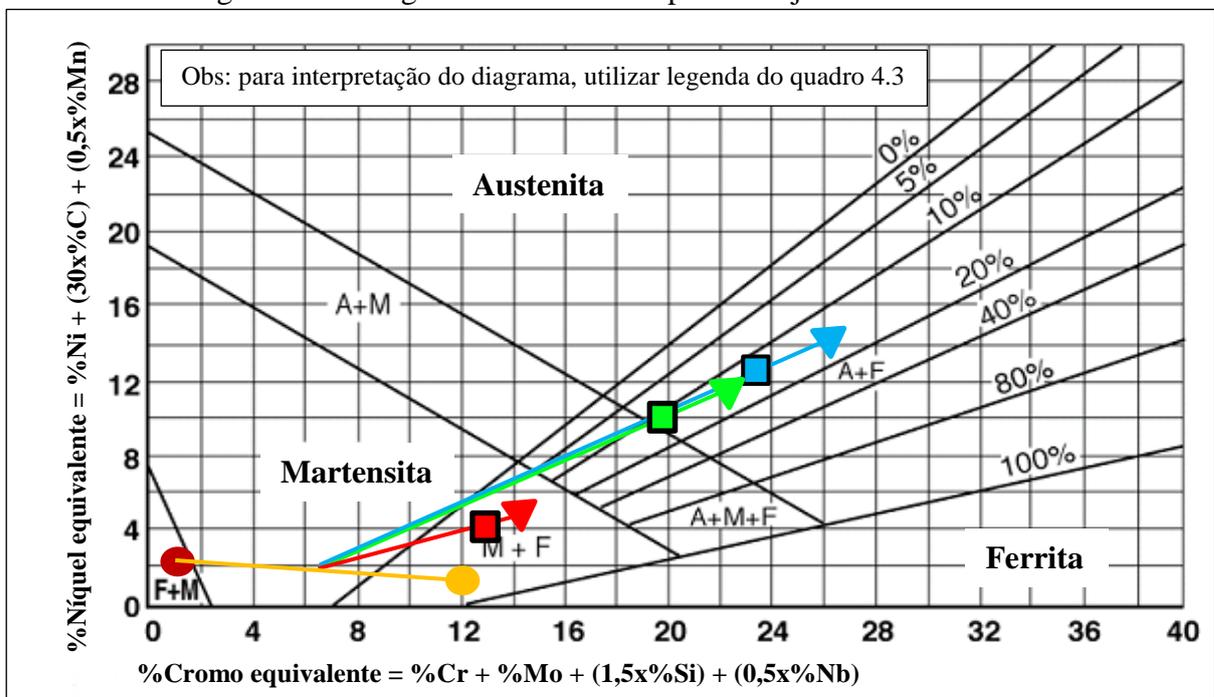
Quadro 4.3 – Descrição diagrama de Schaffler para juntas similares e dissimilares

Legenda	
●	Intersecção entre o cromo e níquel equivalente para o aço inox ASTM A240
●	Intersecção entre o cromo e níquel equivalente para o aço patinável SA350
▼	Intersecção entre o cromo e níquel equivalente para o arame ER 308LSi
▼	Intersecção entre o cromo e níquel equivalente para o arame ER 309LSi
▼	Intersecção entre o cromo e níquel equivalente para o arame ER 410L
■	Indicação da microestrutura para o arame ER 308LSi com diluição de 20%
■	Indicação da microestrutura para o arame ER 309LSi com diluição de 20%
■	Indicação da microestrutura para o arame ER 410L com diluição de 20%

Fonte: o autor (2016).

A figura 4.6 ilustra o diagrama de Schaffler para as juntas soldadas dissimilares.

Figura 4.6 – Diagrama de Schaffler aplicado a juntas dissimilares



Fonte: o autor (2016).

Após a aplicação do método teórico de Schaffler, foi possível estimar que para as juntas similares, o consumível ER 308LSi produziria um metal de solda com microestrutura

predominantemente autênica com alguns precipitados de ferrita. O consumível ER 309 LSi produziu uma região de solda austenítica. Já o ER 410L apresentou uma microestrutura totalmente martensítica para a zona fundida, a qual foi considerada imprópria devido ao fato de ser muito frágil podendo ocasionar uma ruptura quando submetida a esforços mecânicos.

As juntas dissimilares apresentaram microestrutura austenítica similar para os consumíveis ER 308LSi e ER 309 LSi. Entretanto o ER410L novamente apresentou uma região predominante martensítica, sendo considerado impróprio para o processo de fabricação de vagões ferroviários.

4.6 MICRODUREZA

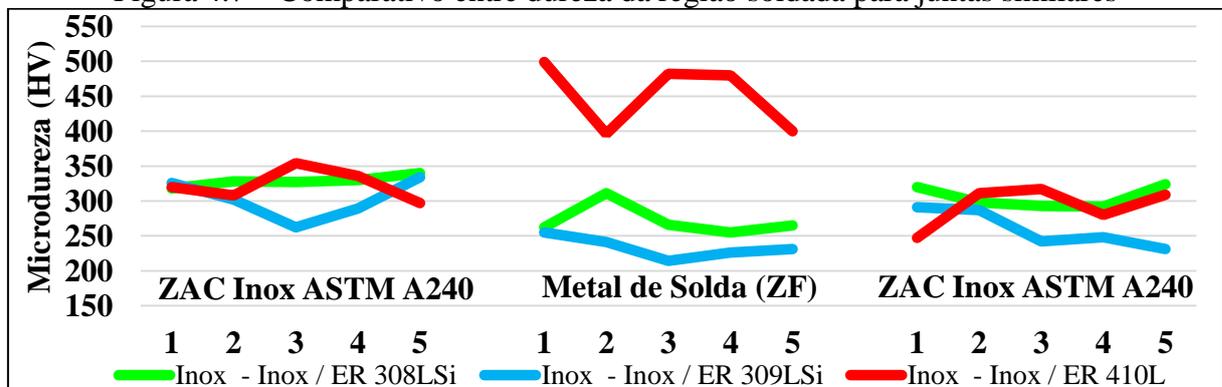
A tabela 4.4 apresenta os resultados referente ao ensaio de microdureza para as juntas similares em aço inox ASTM A240, efetuadas na região da zona afetada pelo calor e no metal de solda através de uma carga de 0,3 kg. A figura 4.7 ilustra o comparativo de dureza.

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de microdureza juntas similares

Un. (HV)	ZAC A (inox)					Metal de Solda					ZAC B (INOX)				
Amostra	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
ER 308LSi	318	328	327	330	340	262	311	266	255	265	320	298	293	292	324
ER 309LSi	326	302	262	289	334	255	241	214	226	231	291	287	242	248	231
ER 410L	320	302	354	336	297	499	396	482	480	400	247	311	317	280	309

Fonte: o autor (2016)

Figura 4.7 – Comparativo entre dureza da região soldada para juntas similares



Fonte: o autor (2016)

Com o ensaio foi possível identificar que os comportamentos da dureza dos três consumíveis para juntas similares, são praticamente iguais na ZAC do inox ASTM A240. Já a região do metal de solda apresentou aumento de dureza para o arame ER 410L, resultado

possivelmente de uma estrutura martensítica conforme indicado pelo diagrama de Schaffler.

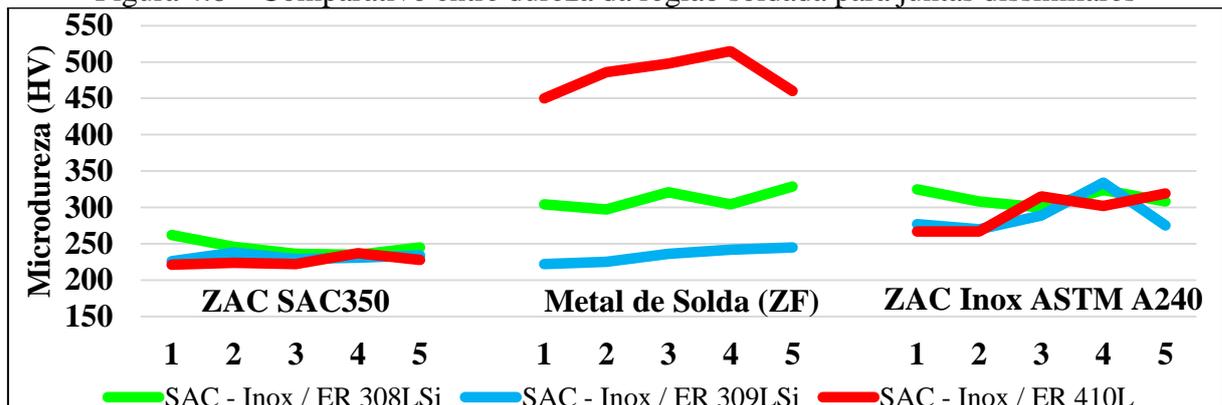
A tabela 4.5 apresenta os resultados referente ao ensaio de microdureza para as juntas dissimilares em aços inox ASTM A240 e pátinavel SAC350, efetuadas na região da zona afetada pelo calor e no metal de solda através de uma carga de 0,3 kg. A figura 4.8 ilustra o comparativo de dureza.

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de microdureza juntas dissimilares

Un. (HV)	ZAC A (SAC350)					Metal de Solda					ZAC B (INOX)				
Amostra	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
ER 308LSi	262	246	236	235	245	304	297	321	304	329	325	308	300	324	308
ER 309LSi	226	238	229	231	234	222	225	236	242	245	277	270	289	334	275
ER 410L	221	224	222	237	228	450	486	498	515	460	267	267	315	302	319

Fonte: o autor (2016)

Figura 4.8 – Comparativo entre dureza da região soldada para juntas dissimilares



Fonte: o autor (2016)

Após o ensaio foi possível identificar que os comportamentos da dureza dos três consumíveis para juntas dissimilares, são praticamente iguais tanto na ZAC do SAC350 como no inox ASTM A240. Já a região do metal de solda apresentou grande aumento de dureza para o arame ER 410L o que possivelmente pode caracterizar uma estrutura martensítica conforme indicado pelo diagrama de Schaffler.

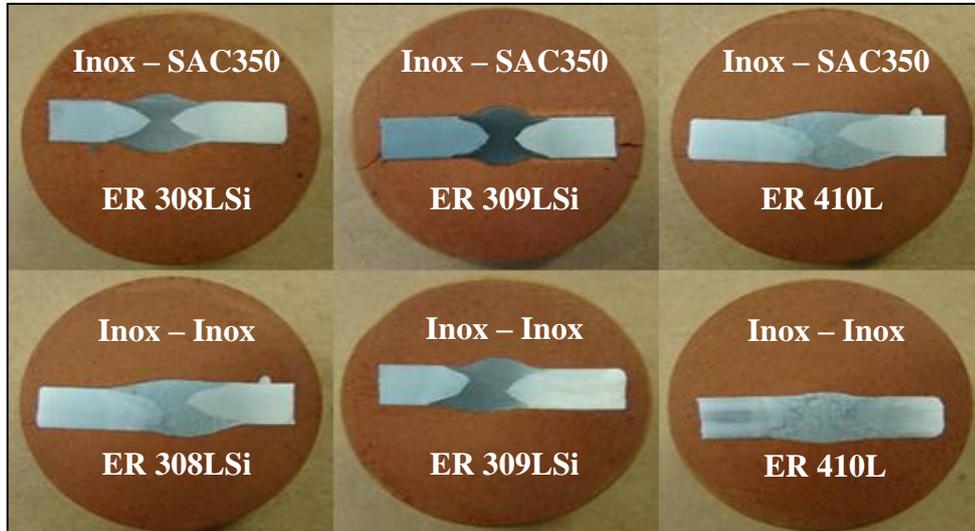
4.7 RESULTADOS DO ENSAIO DE METALOGRAFIA

4.7.1 Macrografia

Os resultados obtidos através dos ensaios macrográficos, mostram que os testes realizados em juntas dissimilares e similares com três metais de adição diferentes, apresentaram

um perfil de solda com penetração total no metal base e ausência de mordeduras. A figura 4.9 ilustra o resultado do ensaio.

Figura 4.9 – Ensaio Macrográfico

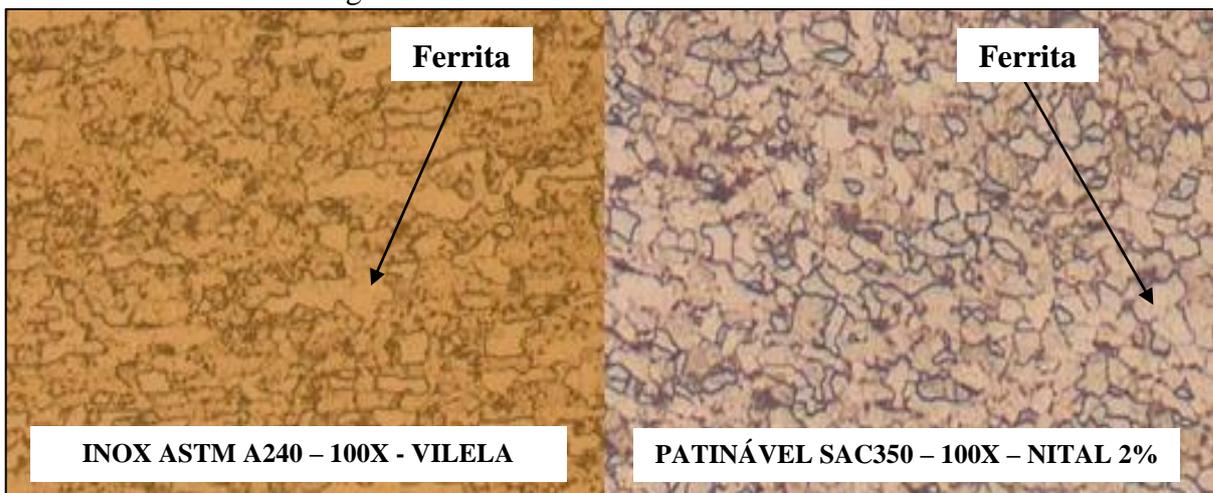


Fonte: o autor (2016)

4.7.2 Metalografia

O ensaio metalográfico realizado buscou compreender e verificar os resultados encontrados nos testes de tração e microdureza. A figura 4.10 ilustra a microestrutura dos metais base utilizados para a fabricação dos corpos de prova.

Figura 4.10 – Microestrutura dos metais base

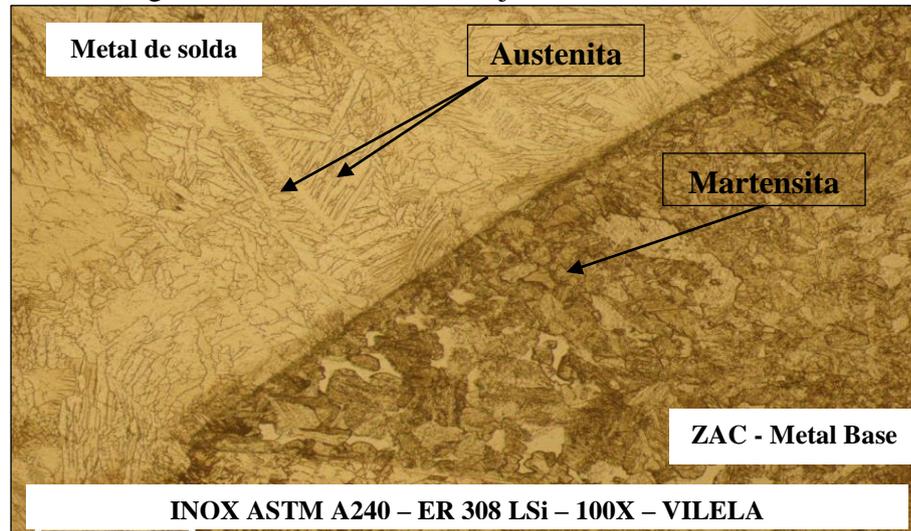


Fonte: o autor (2016)

A figura 4.11, com ampliação de 100x, representa a soldagem da junta similar (inox-inox) com o consumível ER 308LSi. A metalografia identificou no metal de solda uma estrutura

bruta de fusão colunar austenítica . Já a ZAC do metal base apresentou uma região martensítica (com refinamento do grão à medida que se afasta da zona fundida. Ambas as regiões comprovaram a eficácia do método de Schaffler que já indicava essas microestruturas.

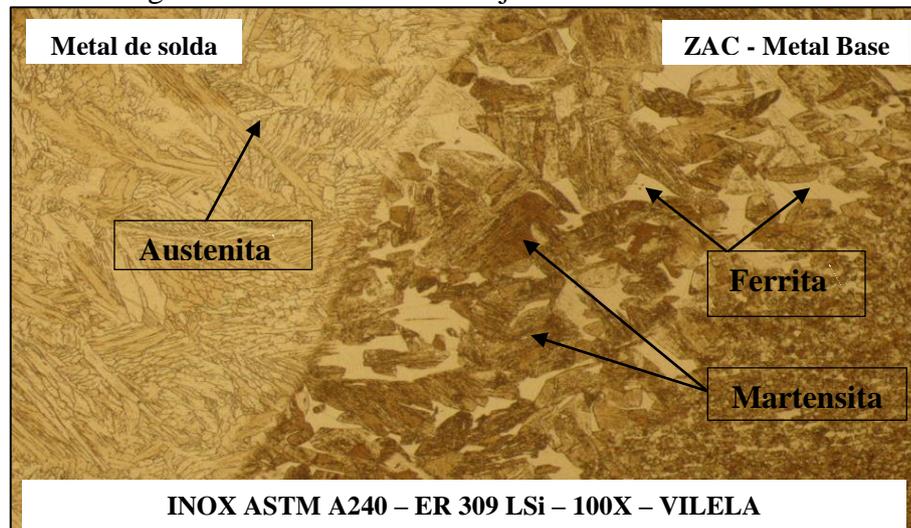
Figura 4.11 – Microestrutura junta similar ER 308LSi



Fonte: o autor (2016)

A figura 4.12, com ampliação de 100x, representa a soldagem da junta similar (inox-inox) com o consumível ER 309LSi. A metalografia identificou no metal de solda uma estrutura bruta de fusão colunar austenítica . A ZAC do metal base apresentou grãos maiores do que o ER 308 LSi, mas com refinamento do mesmo à medida que se afasta da zona fundida. Esta região está caracterizada como martensítica com constituintes de ferrita. Para ambas as regiões o diagrama de Schaffler previu o resultado encontrado, o que reforçou sua aplicabilidade.

Figura 4.12 – Microestrutura junta similar ER 309LSi

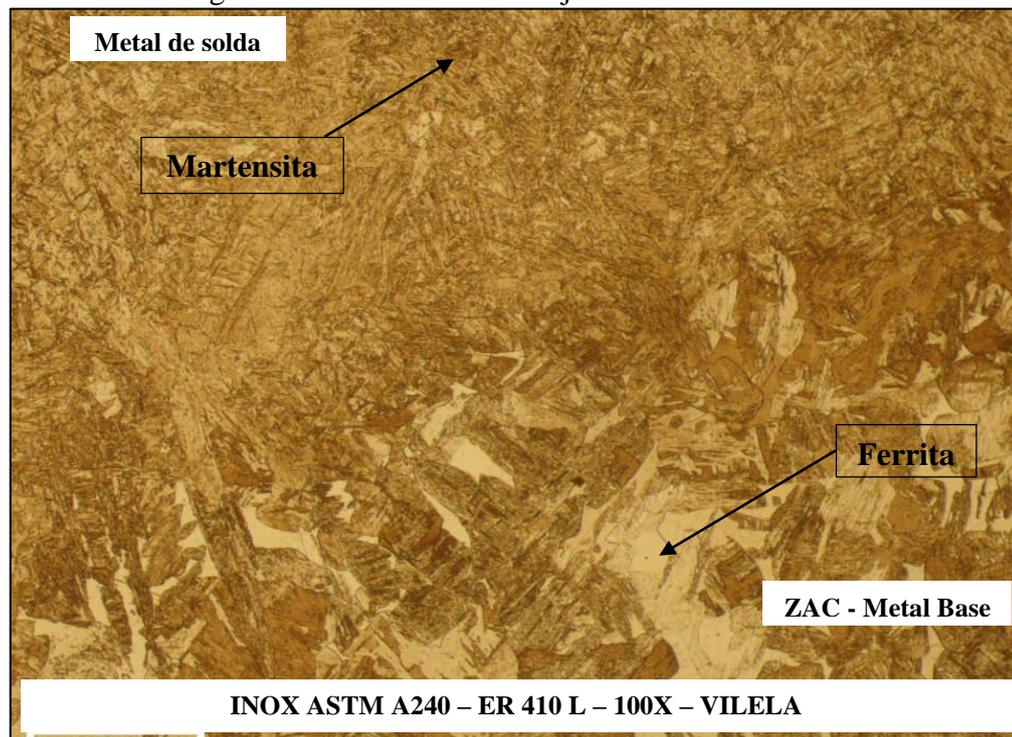


Fonte: o autor (2016)

A figura 4.13, com ampliação de 100x, representa a soldagem da junta similar (inox-inox) com o consumível ER 410L. A metalografia comprovou as regiões indicadas pelo diagrama de Schaffler, onde a zona fundida apresentou uma microestrutura totalmente martensítica, caracterizada por possuir um perfil de dureza elevado, explicando assim o motivo pelo qual o ensaio de microdureza apresentou valores tão elevados para este tipo de arame. Este comportamento é resultante principalmente da composição química do ER 410L que apresenta maior percentual de carbono e menores índices de níquel e cromo quando comparado com o ER 308LSi e ER 309LSi.

Este tipo de microestrutura apresentado pela junta soldada requer um certo cuidado durante o processo de soldagem, uma vez que a estrutura martensítica é indicativo de uma região frágil. Desta forma sua aplicação necessita ser limitada a partes do implemento ferroviário que não estejam submetidos a grandes esforços. Em relação a ZAC do metal base, sua microestrutura está caracterizada em martensita e ferrita.

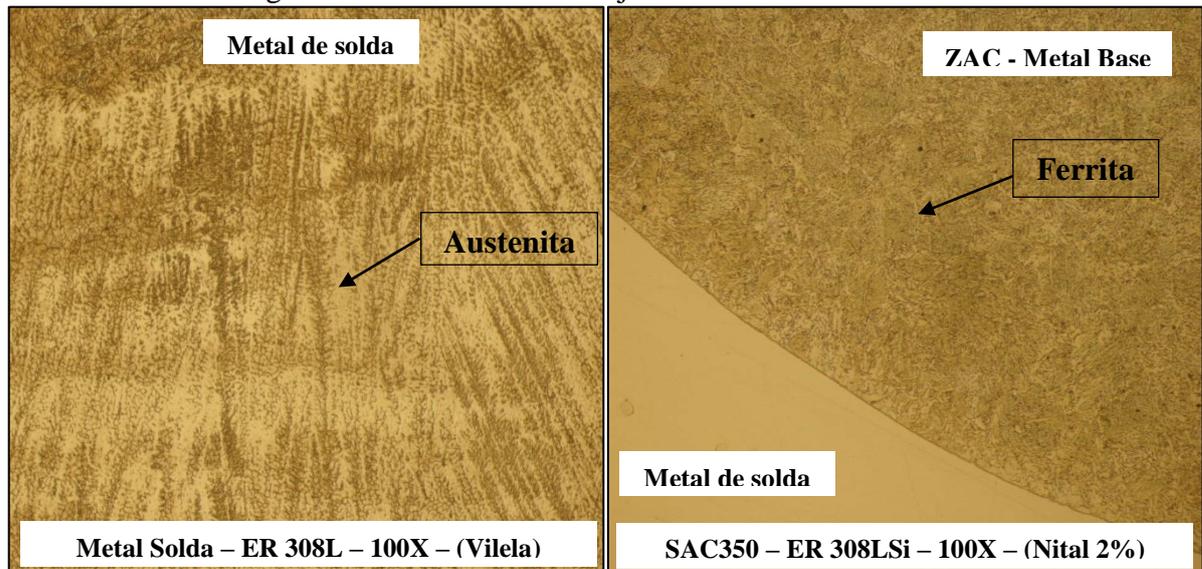
Figura 4.13 – Microestrutura junta similar ER 410L



Fonte: o autor (2016)

A figura 4.14, com ampliação de 100x, representa a soldagem da junta dissimilar (inox-sac) com o consumível ER 308 LSi. A metalografia identificou uma região austenítica para o metal de solda e ferrítica para a ZAC do SAC350. Não foi representada a região da ZAC do inox ASTM A240, uma vez que se assemelha a microestrutura da figura 4.11.

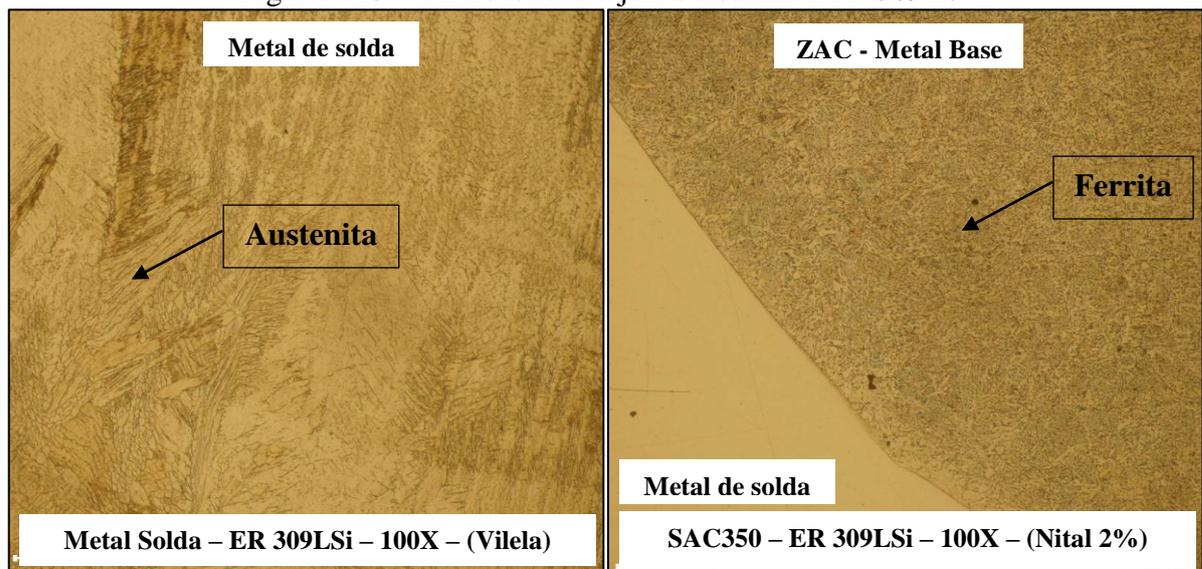
Figura 4.14 – Microestrutura junta dissimilar ER 308LSi



Fonte: o autor (2016)

A figura 4.15, com ampliação de 100x, representa a soldagem da junta dissimilar (inox-sac) com o consumível ER 309LSi. A metalografia resultou uma estrutura bruta de fusão colunar austenítica para a região do metal base, e ferrítica para a ZAC do SAC350. Não foi representada a região da ZAC do inox ASTM A240, uma vez que se assemelha a microestrutura da figura 4.12.

Figura 4.15 – Microestrutura junta dissimilar ER 309LSi

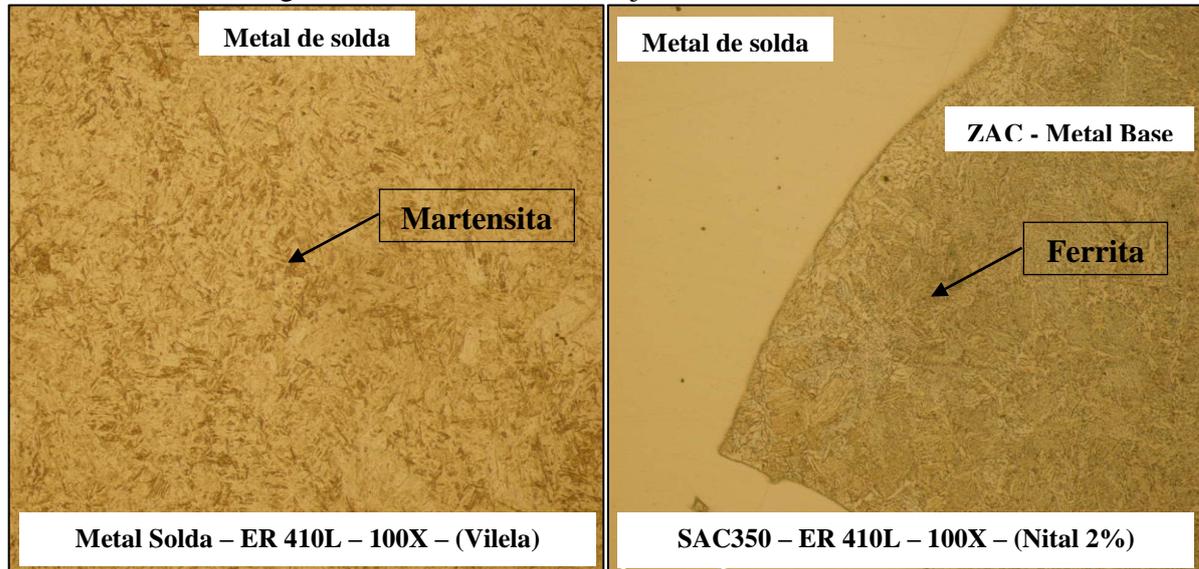


Fonte: o autor (2016)

A figura 4.16, com ampliação de 100x, representa a soldagem da junta dissimilar (inox-sac) com o consumível ER 410L. A metalografia identificou para a região da zona

fundida uma microestrutura predominantemente martensítica e para a ZAC do metal base uma região ferrítica, possuindo os mesmos descritivos citados na explicação da figura 4.13. A região da ZAC do inox ASTM A240 também se assemelha a microestrutura da figura 4.13.

Figura 4.16 – Microestrutura junta dissimilar ER 410L



Fonte: o autor (2016)

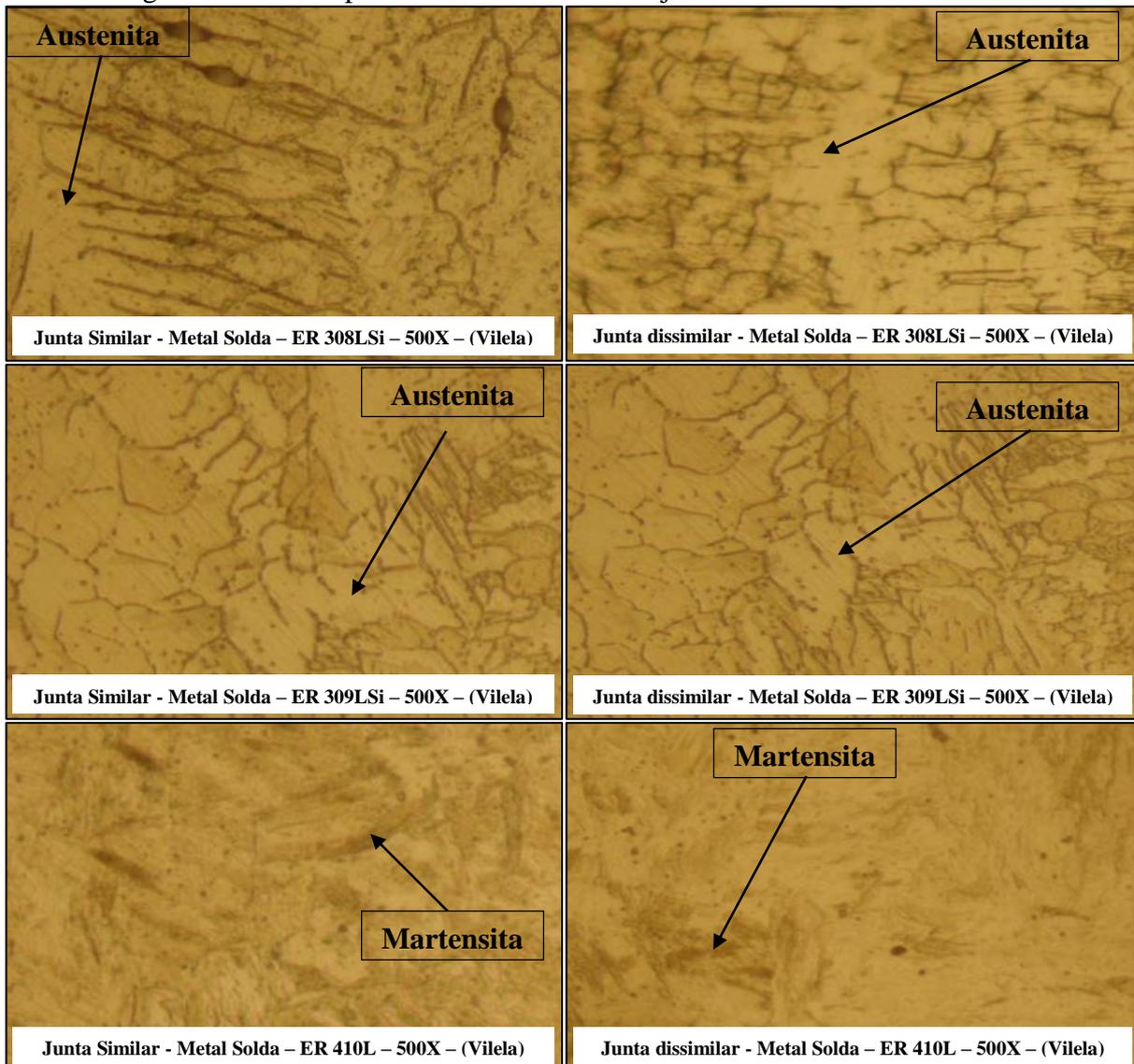
Os principais riscos existentes para as juntas que apresentaram microestrutura martensítica estão relacionadas a perda de ductilidade, tenacidade e resistência a corrosão devido a formação de uma estrutura de granulação grosseira e a precipitação de carbonetos e nitretos. Este tipo de região ainda pode apresentar problemas de soldagem como trincas de solidificação e induzidas pelo hidrogênio principalmente na ZAC. Por outro lado, as juntas que de estrutura austenítica podem apresentar precipitação de carbonetos nos contornos de grão da ZAC, diminuindo assim a resistência a corrosão.

4.7.3 Comparação dos resultados das metalografias

A figura 4.17 ilustra um resumo final referente aos resultados da metalografia comparando a microestrutura do metal de solda do ensaio de micrografia com a previsão gerada pelo diagrama de Schaffler. O gráfico da microdureza e apresentado também com intuito de apresentar a dureza de cada região formada durante o processo de soldagem com os diferentes tipos de metais de adição.

As imagens da esquerda representam as juntas soldadas similares em aço inoxidável, enquanto as da direita ilustram juntas dissimilares em aço inoxidável e patinável.

Figura 4.17 – Comparativo entre ensaios das juntas similares e dissimilares



Fonte: o autor (2016)

A martensita resultante do processo de soldagem com o metal de adição ferrítico ER 410L e digna de um comportamento esperado, uma vez que, dentro dos limites de cromo e carbono, os aços inoxidáveis transformam-se totalmente em austenita em temperaturas próximas a 1000°C. O resfriamento a partir destas, resulta na obtenção de uma estrutura totalmente martensítica de elevada dureza. Por outro lado, quando aquecidos na faixa de 815°C a 950° ocorre uma austenização parcial, resultando no resfriamento uma microestrutura mista de ferrita e martensita (AWS,1998).

4.8 CUSTO DO ARAME DE SOLDA

O custo do metal de adição utilizado no processo de soldagem varia conforme a

necessidade de aplicação da junta soldada, onde as principais são:

- a) tipo de processo de soldagem;
- b) composição química do arame (elementos de liga);
- c) composição química do metal base;
- d) demanda do mercado.

Desta forma foi verificado o comportamento dos arames ER 308 LSi, ER 309LSi e ER 410L na união de materiais similares e dissimilares com o intuito de qualificar um metal de adição com custo inferior ao do processo atual. A tabela 4.6 ilustra o custo de cada arame utilizado no processo de soldagem das juntas.

Tabela 4.6 – Custo dos metais de adição

Metal base	Representatividade do preço/kg	Condição de Utilização	Projeção do valor do processo (%/kg)
ER 308 LSi	0,88	Proposto	Redução de 12%
ER 309 LSi	1	Utilizado atualmente	-
ER 410 L	1,41	Proposto	Acréscimo de 41%

Fonte: o autor (2016)

Conforme valores apresentados da tabela 4.6, o processo de soldagem poderia ser reduzido em até 12% em relação ao metal de adição, substituindo o ER 309 LSi pelo ER 308 LSi. É importante ressaltar que os valores dos arames de solda são alterados constantemente de acordo com a demanda do mercado, e desta forma é necessário estar sempre comparando os preços dos consumíveis afim de escolher o mais adequado para cada situação comercial.

É importante destacar que se essa análise de custo fosse feita em relação a quantidade de elementos de liga (onde teoricamente o material agrega mais valor conforme aumenta a quantidade de elementos de liga) o metal de adição que apresentaria menor custo seria o ER 410L, seguido do ER308 LSi. A tabela 4.7 apresenta os arames e suas referentes quantidades de elementos de liga.

Tabela 4.7 – Percentual de elementos de liga de cada metal de adição

Arame	%Cr	% Ni	Relação de custo
ER 309 LSi	23,0-25,0	12,0-14,0	Mais caro
ER 308 LSi	19,5-22,0	9,0-11,0	Intermediário
ER 410 L	11,5-13,5	0,600	Mais barato

Fonte: Adaptado de Techno-Alloys (2016).

5 CONCLUSÕES

Com base nos testes realizados, nos resultados obtidos e confrontando o processo atual com os demais propostos, concluiu-se que para as juntas em aço inox:

- a) a soldagem de topo de juntas em inox ASTM A240 com os três tipos de metais de adição (ER 308LSi, ER 309LSi e ER410L) atenderam o mínimo limite de ruptura do material base em todas as situações propostas;
- b) os corpos de provas submetidos ao ensaio de dobramento foram aprovados já que atenderam os quesitos mínimos de trincas e descontinuidades para os testes;
- c) os arames ER 308 LSi e ER 309 LSi obtiveram valores abaixo de 330 HV, os quais foram considerados ideais para o perfil de dureza. Através do diagrama teórico de Schaffler foi estimado uma microestrutura austenítica para a zona fundida dos dois consumíveis, onde tal região pode ser comprovada no ensaio metalográfico;
- d) o ER 410L, que possui mais carbono e menores percentuais de cromo e níquel, apresentou um perfil de dureza elevado em relação aos outros consumíveis. Tal ocorrência foi atribuída à região martensítica indicada no diagrama teórico de Schaffler, a qual foi confirmada no ensaio metalográfico.

Para as juntas dissimilares foi possível concluir que:

- a) a soldagem de topo de juntas dissimilares em inox ASTM A240 e patinável SAC350 com os três tipos de metais de adição (ER 308LSi, ER 309LSi e ER410L) atenderam o mínimo limite de ruptura do SAC350 em todas as situações;
- b) os corpos de provas submetidos ao ensaio de dobramento foram aprovados já que atenderam os quesitos de trincas e descontinuidades mínimos para os testes;
- c) diferentemente das juntas similares, o ER 308 LSi apresentou um perfil de dureza um pouco maior que o ER 309 LSi, mas da mesma forma foram aprovados já que não ultrapassaram o valor máximo de 330 HV. Em suas microestruturas, o diagrama de Schaffler apontou para a região soldada austenítica, podendo ser comprovada no ensaio metalográfico;
- d) o ER 410L apresentou comportamento semelhante ao processo de soldagem de juntas similares, ultrapassando o valor ideal para o perfil de dureza e apresentando tanto para o diagrama de Schaffler como para o ensaio metalográfico, uma microestrutura martensítica.

Desta forma foi possível evidenciar que tanto para as juntas similares como para as juntas dissimilares, o emprego dos consumíveis ER 308LSi e ER 309LSi na fabricação de implementos ferroviários foram considerados aprovados sem nenhum tipo de restrição aos ensaios realizados. Já o arame ER 410L, que apresentou um perfil de dureza elevado devido a uma região martensítica, indicou ser uma junta frágil e que por motivos de segurança não poderia ser submetido a cargas de trabalho cíclicas devido à grande possibilidade de ocorrer uma falha por fadiga.

Por fim é possível reduzir o custo de fabricação do implemento ferroviário em até 13%, substituindo o metal de adição utilizado atualmente no processo (ER 309LSi) pelo ER 308LSi. Isso é possível já que o ER 308 LSi foi aprovado em todos os ensaios realizados durante os testes das juntas soldadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACESITA. **Apostila de Soldagem em Aço Inox**. 2006. Disponível em: <<http://guias.oxigenio.com/apostila-de-soldagem-em-aco-inox>>. Acesso em: 12 abr. 2016.
- ASM. Gas-metal arc welding. **Welding Handbook**, 2.ed., v.6, 1994. p. 569-581.
- ATES, H. Prediction of gas metal arc welding parameters based on artificial neural networks. **Materials and Design**, 2.ed., v.28, 2007. p. 2015-2023.
- AWS. **Welding Handbook: Materials and Applications - Part 1**. 8 ed. Miami: American Welding Society, v.4, 1998.
- BAESLACK, W. A.; LIPPOLD, J. C.; SAVAGE, W. F. Unmixed Zones Formation in Austenitic Stainless Steel. **Welding Journal**, v.58, 1979. p. 168-176.
- BARBOSA, R. P. **Apostila Metalurgia da Soldagem: Soldabilidade dos Materiais**. UNILESTEMG: Coronel Fabriciano, 2007.
- BAULY, J. C. **Caracterização Microestrutural e Propriedades de Juntas Dissimilares entre Aços Inoxidáveis Fabricadas por Processos de Fusão**. 2000. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências de Reatores Nucleares de Potência, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2000.
- BERMEJO, A. V. Predictive and measurement methods for delta ferrite determination in stainless steels. **Weld Journal**, 4.ed., v.91, 2012. p. 113.
- BINGUL, Z.; COOK, G. E.. A real time prediction model of electrode extension for GMAW. **IEEE/ASME Transactions On Mechatronics**, 1.ed., v.11, 2006. p. 47-54.
- CARVALHO, M. J. **Manual Técnico de Soldagem do Aço Inox**. São Paulo: 2012.
- DOODY, T. Intermediate mixed zones in dissimilar metals welds for sour service. **Weld Journal**, 3.ed., v.71, 1992. p. 55-60.
- ESAB. **Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW)**. 2014. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm>. Acesso em: 25 mar. 2016.
- FARIA, R. J. **Soldabilidade do aço USISAC350 na construção metálica**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2010.
- FELDSTEIN, J.G. **Dissimilar welds with stainless steel**. **Metals Handbook**, vol.6, ASM. 1993.
- FOLKARD, E. **Welding Metallurgy of Stainless Steels**. Springer-Verlag Wien: New York, 1988.

KARLSSON, L. Aços Inoxidáveis Passado, Presente e Futuro. **Revista Solução**, Minas Gerais: Contagem, 2005.

LEE, Y. D.; KIM, H.; AHN, S. K.: **Effects of microalloying elements on corrosion resistant and toughness of 26%Cr ferritic stainless steels**. In Stainless steel'99. V. 3, AIM, Italy, Anais. 1999.

LULA, R. A. **Stainless steel**. American Society for Metals, Ohio: EUA, 1989

LUNDIN, C. D. Dissimilar Metal Welds Transition Joints Literature Review. **Welding Journal**, 2.ed., v.61, 1982. p. 58-63.

LUZ, T. S. **Aspectos Operacionais e Metalúrgicos da Soldagem do Aço Inoxidável Ferrítico com 11% de Cromo**. 2009. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia: Uberlândia, 2009

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Complexas: processos**. Porto Alegre: 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. Osasco: Escola SENAI "Nadir Dias Figueiredo", 2001.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Universidade Federal de Minas Gerais: Minas Gerais, 2011.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1982.

PANNONI, F D. Os Versáteis Aços Patináveis. **Gerdau**, Rio de Janeiro, v. 105, 2012.

QUITES, A.M. "**Apostila Instituto Brasileiro de Qualidade Nuclear: Soldagem Soldabilidade**", UFSC: Santa Catarina, 1990.

RANDON. **Histórico da Empresa**. 2016. Disponível em:
<<http://www.randon.com.br/pt/enterprise/historico>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

TECHNO-ALLOYS. **Catálogo de consumíveis**. Disponível em:
<<http://www.techno-alloys.com/Ligas-Inoxidaveis.html>>. Acesso em: 05 mai. 2016.

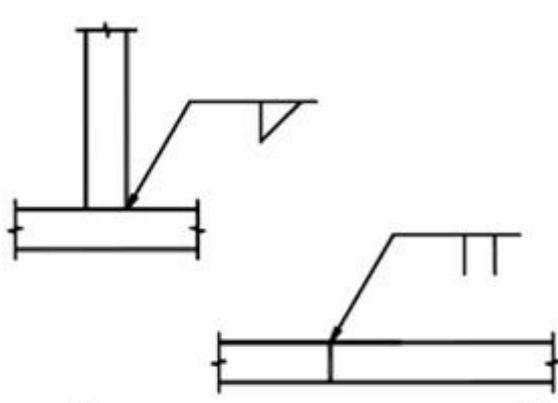
WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

N° do ensaio	Tipo da junta / arame	Alongamento elástico (%)	Força máxima (N)
1	Inox – Inox / ER 308LSi	19,07	66741,31
2	Inox – Inox / ER 308LSi	18,24	67383,45
3	Inox – Inox / ER 308LSi	19,45	64706,04
4	Inox – Inox / ER 308LSi	17,62	67141,13
5	Inox – Inox / ER 309LSi	17,91	66462,7
6	Inox – Inox / ER 309LSi	20,21	65711,62
7	Inox – Inox / ER 309LSi	23,26	65093,7
8	Inox – Inox / ER 309LSi	21,37	64657,6
9	Inox – Inox / ER 410L	21,61	66123,5
10	Inox – Inox / ER 410L	18,78	66729,25
11	Inox – Inox / ER 410L	19,41	67007,86
12	Inox – Inox / ER 410L	19,87	66729,25
13	Inox–SAC350 / ER 308LSi	14,79	64148,73
14	Inox–SAC350 / ER 308LSi	14,24	63530,91
15	Inox–SAC350 / ER 308LSi	12,45	63603,58
16	Inox–SAC350 / ER 308LSi	13,14	63022,04
17	Inox–SAC350 / ER 309LSi	18,54	61883,29
18	Inox–SAC350 / ER 309LSi	14,34	61422,87
19	Inox–SAC350 / ER 309LSi	18,70	61871,13
20	Inox–SAC350 / ER 309LSi	15,17	59787,32
21	Inox–SAC350 / ER 410L	17,67	63821,68
22	Inox–SAC350 / ER 410L	16,83	63022,04
23	Inox–SAC350 / ER 410L	15,88	64984,65
24	Inox–SAC350 / ER 410L	16,15	63967,01

ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM 108

	ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM (EPS)	Pág.: 1 de 1
		Data aprov. RQP:
		RQP N°: 1425
Revisão: 00	Itens revisados:	
Data Rev.: 14/12/2015		

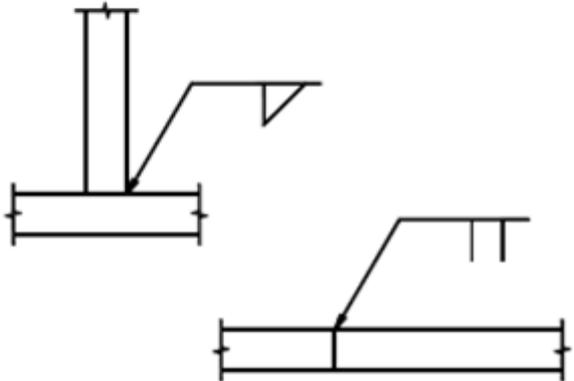
EPS 108	APLICAÇÃO: Aços inoxidáveis ferríticos e aços resistentes a corrosão atmosférica em geral.	
Croqui da Junta 		Tecimento 
Passe	Voltagem	Amperagem
1	21-23 V	170-200 A
Processo: GMAW		Gás: Ar+2%O ₂
Posição: plana, horizontal e vertical descendente.		
Metal de Adição: ER309LSi Ø 1,2 mm		

Dados Complementares para Qualificação

Metal Base 1: OSAC 350 ou similar	Espessura: até 6 mm	
Metal Base 2: ASTM 240 ou SAE 410 –ou similar	Espessura: até 6 mm	
Corrente: Contínua	Polaridade: Inversa	Velocidade de Soldagem: cm/min.
Limpeza Inicial: Remover óleos, oxidação e ferrugem.		
Limpeza entre Passes: N/a		Vazão: 10-14l/min
Velocidade de deslocamento tocha: 40-60cm/min		

ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM 111

	ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM (EPS)	Pág.: 1
		Data aprov. RQP: 25/02/2016
		RQP Nº: 1425
REVISÃO: 00	Definido parâmetros do processo de soldagem	
Data Rev.: 25/02/2016		

EPS 111	APLICAÇÃO: Aplicações em chapas de aço Inoxidável ferrítico.	
Croqui da Junta 		Tecimento 
Passe	Voltagem	Amperagem
1	20 – 24 V	200-240 A
Processo: GMAW		Gás: Ar + 2% CO ₂
Posição: Plana, Horizontal, vertical descendente		
Velocidade de soldagem: 60 a 90 cm/min		
Metal de Adição:	ER309LSi - → 1,20 mm	

Dados Complementares para Qualificação

Metal Bas Aço Inox. ASTM 240 ou SAE439 ou similar		Espessura: 3,2 a 16 mm
Metal Bas Aço Inox. ASTM 240 ou SAE439 ou similar		Espessura: 3,2 a 16 mm
Corrente: Contínua	Polaridade: Inversa	Distância do Bico/Bocal a Peça: 15 a 20 mm.
Limpeza Inicial: Eliminar oleosidade, sujeira, poeira, tinta, ferrugem.		Vazão: 10 a 15 l/min.
Limpeza entre Passes: Remover excesso de escória quando houver mais de um passe.		

ANEXO C – PROCEDIMENTO QUALIFICAÇÃO DE SOLDADOR 115

		Procedimento de Gestão		Nº Documento:	Revisão:
		Qualificação do Soldador		00-115	00
				Elaborado por:	Data:
				Victor Hugo V. Acosta	16/04/2015
				Aprovado por:	Data:
				Fernando Bortolini	16/04/2015
INF.	Descrição do sub processo				
	Executar os ensaios necessários para qualificação do soldador.				
Fornecedor	Entradas		Saídas		Cliente
Atividades	Tarefas		Responsável	mentos/ Reg	
1. Verificar necessidade de qualificação conforme abrangência	a) Avaliar as qualificações do soldador em relação ao processo existente; b) Verificar a abrangência da qualificação conforme normas; c) Caso as qualificações não atendam o especificado, realizar a qualificação.		Analista da qualidade; Analista Produção	EE007 QW-416	
2. Preparar corpos-de-prova e selecionar especificação	a) Preparar corpos-de-prova conforme especificado pelo projeto e ASME IX.		Soldador	QW-463.1	
3. Executar processo	a) Executar o processo de soldagem conforme especificado. b) Acompanhar a execução do processo e identificar os corpos-de-prova. c) Registrar os parâmetros reais utilizados no processo.		Soldador; Orientador de solda		
4. Inspeção visual do corpo-de-prova	a) Avaliar o aspecto visual do corpo-de-prova, verificando a ausência de trincas superficiais, poros, mordeduras excessivas.		Orientador de solda		
5. Efetuar ensaios mecânicos	a) Preparar corpos-de-prova para o ensaio, se necessário. O raio-x ou raio-gama é um teste alternativo para aprovação do soldador. b) Realizar o ensaio definido; c) Comparar o resultado do ensaio com os seguintes Critérios de aprovação: (1) Ensaio de dobramento guiado: desconsiderar trincas nas extremidades desde que sejam inferiores a 3mm; os corpos-de-prova para serem aprovados devem estar isentos de trincas individuais superiores a 03 (três) mm; a soma do comprimento das trincas menores a 3 mm não deve ultrapassar a 3 mm. Conforme QW-163 (2) Ensaio de dobramento Lateral: se não quebrar, aprova. Se quebrar, os corpos-de-prova não devem apresentar falta de fusão ou trincas ou somatório dos poros e inclusões não deve exceder 10 mm. Confore QW182. (3) Ensaio Macrográfico: os corpos-de-prova para serem aprovados não devem apresentar falta de fusão e a penetração na raiz da solda deve ser no mínimo, 0,5 mm. Conforme QW-183. (4) Ensaio Radiográfico: os corpos-de-prova para serem aprovados		Soldador Analista da Qualidade	QW-452; ASME IX, Article I	
6. Reteste	a) Aplicar um novo teste, com os mesmos critérios especificados, caso o resultado do ensaio anterior for reprovado. b) O reteste consiste em soldar 02 corpos-de-prova de cada amostra reprovada.		Orientador de solda; Analista da Qualidade		
7. Segunda reprovação	a) Se ocorrer reprovação nestas duas amostras, o soldador recebe novo treinamento e faz o teste com 01 corpo-de-prova com a mesma quantidade de corpos de prova inicial. b) Caso este seja reprovado, recebe novamente a multa e realiza o teste com 02 corpos-de-prova de cada amostra reprovada. c) Persistindo a reprovação, o funcionário será considerado inapto a realizar soldas de segurança e controle.		Orientador de solda; Coordenador de Operação		
8. Encaminha para treinamento ou redefine necessidade de qualificação	a) Decidir sobre redefinir a qualificação do soldador ou encaminhar para treinamento conforme a Abrangência da qualificação do soldador.		Coordenador de Operação		
9. Registro de qualificação do soldador	a) Registrar no "REGISTRO DA QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO (RQP)" os resultados obtidos.		Analista da qualidade	Registro da Qualificação do Processo (RQP)	
10. Registrar resultado do ensaio	a) Registrar na "Ficha de Análise e Ensaio" o resultado obtido.		Analista da qualidade	Ficha de Análise e Ensaio	
11. Validade da Qualificação	a) O soldador que deixar de soldar uma determinada EPS por um período igual ou superior a 6 meses perde a qualificação, podendo a qualquer tempo se qualificar novamente		Coordenador de Operação	QW322.1	

ANEXO D – RELATÓRIO INSPEÇÃO RADIOGRÁFICA



capaz

RELATÓRIO DE ENSAIO RADIOGRÁFICO
RADIOGRAPHIC TESTING REPORT

Relatório N°: Report N°: 0047/2016
 Data: 11/07/2016
 Folha: 001/001
 Sheet: 001/001

Fabricante/Manufacturer: RANDON
 Procedimento/Procedure: CZP 035 REV 4
 Chambré: V

Projeto/Project: CORPO DE PROVA
 Equipamento/Equipment: TANQUE
 Radiação/Radiation: RAIOS GAMA

Foco/Focus size: 3,0X2,0MM
 Isótopo/Isotope: IR 192

Fonte n°/Source n°: 8468
 Modelo/Model: NA
 Equip. Raio X/ Ray Equip.:
 Ecran Diant./Front Screen: 0,010

KV: NA
 mA: NA
 Estágio do Ensaio: N/A
 Cond. Superficial: ESCOVADO
 Densidade/Density: 2,00 A 3,50

Tempo Exp./Exp. Time: N/A
 Tempo revelação/Bath temp.: 20 C
 Tempo revelação/Development time.: 5,0

Operador/Operator: ANDRE CARDOSO DA SILVA
 Auxiliar/Radiographer Trainee: JOSE AMILTON CARDOSO

Cliente/Client: RANDON SA IMPLEMENTOS E PARTICIPACOES
 Local/Place: CAXIAS DO SUL
 Norma de Referência/Reference code: ASME VIII UW 52

Atividade/Activity: 1BC1
 RX Foco/Focus size: NA
 Ecran Tras./ Back Screen: 0,010

Irradiador/Gamma box: 12451
 Equip. Raio X/ Ray Equip.:
 Ecran Diant./Front Screen: 0,005
 Filme/Film: FUJI 50

Tempo Exp./Exp. Time: N/A
 Tempo revelação/Bath temp.: 20 C
 Tempo revelação/Development time.: 5,0

RIA/DIR: AJOMAEEL FERRARI
 Operador/Operator: ANDRE CARDOSO DA SILVA

Tempo Exp./Exp. Time: N/A
 Tempo revelação/Bath temp.: 20 C
 Tempo revelação/Development time.: 5,0

Film N°: 00385, 00386, 00387, 00388, 00389, 00390
 Equipamento/Desenho: SAC-SAC
 Posição Junta: 000-001 1, 000-001 2, 000-001 3, 000-001 4, 001-002 5, 002-000 6
 Esp. (mm) / Thick (mm): 4,75
 Raiz Root: 3478

Proc. Sold. / Weld. Proc.: GMAW
 Pos. Sold. / Pos. Weld Rad. Tech.: PS-VS
 DFF (mm) / FFD: 400MM
 Metal Base: ACO INOX
 Pen. Geom. / Pen. Geom.: NA
 Tam. Filme / Film Size: B

Técnica radiográfica/Radiographic technique: Paredes Simples Vista Simples / SW-SV: Single Wall - Single View
 PD-VS: Parede Dupla Vista Simples / DW-SV: Double Wall - Single View
 PD-VD: Parede Dupla Vista Dupla / DW-DV: Double Wall - Double View
 PVP: Vista Panorâmica / PV: Panoramic View
 VS: Vista Simples / SV: Single view

Tamanho filme/film size: A - 3 1/2 X 5 1/2, B - 3 1/2 X 17, C - 4 1/2 X 8 1/2, D - 4 1/2 X 17, E - 14 X 17

Defeitos/Defects: TL - Trinca longitudinal/Longitudinal crack, IE - Inclusão de escória/Slag inclusion, TT - Trinca transversal/Transversal crack, MI - Inclusão metálica/Metallic inclusion, FP - Falta de penetração/Lack of penetration, CI - Concavidade interna/Concavity

Defeitos/Defects: FF - Falta de fusão/Lack Fusion, CA - Cavidade alongada/Elongated Cavity, EP - Penet. excessiva/Excess. Penetration, MI - Inclusão metálica/Metallic inclusion, PO - Porosidade/Porosity, ME - External undercut/Undercut externa

Resultados/Results: A - Aprovado/Approved, R - Reprovado/Rejected, RE - Repetir/To repeat, EC - Ensaio complementar/Complementary examination

Resultados/Results: SUPERVISOR: FISCALIZAÇÃO/FISCALIZATION

INSPECTOR CAPAZ/CAPAZ INSPECTOR
 Daniel G. G.owski
 Inspetor de Radiografia
 ASNT N° 6700 RT-3476-L

INSPEÇÃO RADIOGRÁFICA