AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CARACTERIZAÇÕES MICROESTRUTURAIS E AVALIAÇÕES DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS JUNTAS EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 301 L
SOLDADAS POR MIG E SUBMETIDAS AO REPARO PELO PROCESSO TIG

EDVALDO ROBERTO DE SOUZA

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Maurício David M. das Neves

São Paulo
2012

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

CARACTERIZAÇÕES MICROESTRUTURAIS E AVALIAÇÕES DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS JUNTAS EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 301 L
SOLDADAS POR MIG E SUBMETIDAS AO REPARO PELO PROCESSO TIG

EDVALDO ROBERTO DE SOUZA

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Maurício David M. das Neves

Versão Corrigida
Versão original disponível no IPEN

São Paulo
2012

Dedicatória

Em primeiro lugar quero dedicar este trabalho a minha querida polaca Katia Tomaszewska, esposa e companheira que sempre esteve a meu lado, não só nesta triunfante jornada, mas também em todas as outras jornadas, nos meus cursos de especialização e também de graduação. Esta mulher, mãe, esposa, companheira que soube me apoiar nas horas mais difíceis e que nunca me deixou desanimar, muito menos desistir, ela que, nos momentos de dificuldade e devido aos compromissos das aulas e deveres durante todos estes anos, cobriu com mérito a minha ausência no papel de pai, pois ela com coragem, chamou para si a responsabilidade da educação dos nossos filhos, tarefa esta que fez com mérito e de forma brilhante. A ela devo mais esta conquista, na certeza de que “obrigado” é pouco perante as inúmeras coisas, que ao longo da minha vida, ela tem me proporcionado. Peço a Deus que a abençoe sempre, pois sem ela nada disso seria possível.

Dedico também aos meus pais Ercílio e Natália que, embora não estejam mais conosco, foram fundamentais nesta conquista. Pela educação, carinho, gestos e atitudes que resultaram na pessoa que me tornei. A eles todo o meu respeito, minha saudade e meus profundos sentimentos de carinho e gratidão por tudo que foram e fizeram por mim, na certeza que de algum lugar estão aplaudindo e participando de mais esta conquista.

Edvaldo R. de Souza

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer o empenho do professor orientador Dr Mauricio David Martins das Neves, pelo apoio nas horas mais difíceis, não deixando que as dificuldades encontradas durante o percurso atrapalhassem os andamentos dos trabalhos. Meus sinceros agradecimentos, pois sem seu apoio o trabalho não teria a amplitude que alcançou.

Ao Prof. Dr Jose R. Berretta do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Aos técnicos: Luiz Carlos E. da Silva (laboratório de soldagem e metalurgia do pó); Celso V. Moraes (microscopia eletrônica) e Mariano Castagnet (ensaios destrutivos). Aos bolsistas de iniciação científica Douglas P. Souza e Yuri Durighetto.

Aos Professores Rodrigo Magnabosco do Centro de Laboratório de Materiais (CLM) e ao Prof. Sergio Delijaicov do Centro Universitário da FEI que com suas equipes possibilitaram a utilização da infraestrutura laboratorial desta instituição.

Na empresa Alstom, em especial ao técnico de soldagem Edvaldo Silva (laboratório de soldagem) na confecção dos corpos de prova; técnico de soldagem Antônio S. Pegoraro; ao funileiro e grande amigo Nelson Ferreira, ao Engenheiro André Rocha; na logística Adailson Lopes e Marcos Oliveira; ao supervisor Engenheiro Duilio Pilotto e Marcos Mazzoncine; no controle de qualidade aos inspetores Yutaka Yke e Maurício Ferlin.

Na empresa NMHG; ao companheiro Ednaldo Campos com apoio fundamental me incentivou a ingressar neste estudo.

Na FITO (Fundação Instituto Tecnológico de Osasco): Elaine Bueno, Benedita Bueno e Cláudia Finardi pelo apoio técnico e aos professores Antônio Sérgio Vieira, Maurício O. Perez e Ari Gomes Silva (in memoriam) que me apoiaram desde o início desta jornada.

Ao companheiro de Senai Alex de Carvalho na usinagem das amostras.

Nas empresas nas quais tenho prestado serviço e que proporcionaram um horário versátil, possibilitando meu comparecimento às aulas e às atividades nos laboratórios do IPEN. Na LTK, o apoio do engenheiro líder Fabio Simão; na

Tekhnites nas pessoas dos engenheiros Milton Neves Coimbra e Rodolfo Coimbra.

No Metrô de São Paulo ao Supervisor de oficina João Adauto Dias que ajudou nos reparos com solda TIG e L.P. das amostras, ao supervisor de engenharia Marcio Stevani e em especial a engenheira Silmara Martinez que tanto me apoiou na realização deste trabalho.

Aos amigos incentivadores e em especial a meus filhos Yanes e Yago que foram fundamentais no apoio e formatação do trabalho.

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS JUNTAS EM AÇO AISI 301 L SOLDADAS POR MIG E SUBMETIDAS AO REPARO PELO PROCESSO TIG.

Edvaldo Roberto de Souza

RESUMO

A soldagem tem grande importância no setor metroferroviário, pois é empregada na fabricação de componentes estruturais e no acabamento de vagões de passageiros, que em sua maior parte são de aço inoxidável. As juntas soldadas podem apresentar descontinuidades que são interrupções que afetam as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada. A presença destas descontinuidades, dependendo do seu tamanho, natureza ou efeito combinado, pode ocasionar a reprovação da junta soldada, quer pela redução de propriedades mecânicas ou pela não aceitação, segundo critérios estabelecidos em normas. Uma estrutura que tenha uma solda reprovada durante sua qualificação ou inspeção, pela presença de descontinuidades pode ser recuperada, por meio de um retrabalho a ser realizado nesta junta. A refusão do cordão de solda por meio do processo TIG (Tungsten Inert Gas), sem a utilização do material de adição, é uma técnica de retrabalho que pode ser empregada, em especial pela viabilidade técnica e econômica do processo. Neste estudo analisou-se a influência que o processo de reparo por soldagem TIG exerceu no comportamento mecânico e microestrutural das juntas soldadas pelo processo MIG, por meio de: ensaios mecânicos (tração, fadiga e microdureza Vickers), ensaios não destrutivos (inspeção visual e líquidos penetrantes) e caracterização microestrutural do cordão de solda.

Resultados das amostras de ensaio de tração e fadiga indicaram que o reparo dos cordões de solda não alterou o comportamento mecânico das juntas.

As juntas submetidas ao reparo nas quais foram retirados os reforços dos cordões apresentaram modificações nas propriedades mecânicas, mas também apresentaram resultados satisfatórios.

Palavra chave: TIG; aço inoxidável; refusão; retrabalho, reparo

MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS IN STEEL AISI 301 L WELDED BY MIG AND SUBMITTED TO REPAIR BY TIG PROCESS

Edvaldo Roberto de Souza

ABSTRACT

The welding has great importance in manufacture of subway cars because it is used in the manufacture of structural components and finishing in passenger cars which are mostly stainless steel. Joints may show the presence of discontinuities. The discontinuities are interruptions that affect the mechanical and metallurgical properties of the weld. The presence of these discontinuities, depending on their size, nature or the combined effect may lead to failure of the weld either by reduction of mechanical properties or non-acceptance criteria established in standards. A structure that has a weld failed during its qualification or inspection by the presence of discontinuities can be retrieved through a rework to be done in this joint. The remelting of the weld using the TIG process without the use of additional material, rework is a technique that can be employed in particular the technical and economic feasibility of the process. This study analyzes the influence that the process of TIG welding rework has on mechanical behavior and microstructure of welded joints by means of: mechanical tests (tensile and Vickers hardness), non-destructive testing (visual inspection and liquid penetrant) and characterization microstructure of the weld.

Results of tensile test specimens and fatigue indicated that the repair of the weld beads did not change the mechanical behavior of joints.

The joints subjected to repair in which they were removed the ribs of the beads showed changes in the mechanical properties, but also had satisfactory results.

Key word: TIG, stainless steel, remelting; rework, repair

SUMÁRIO

Dedicatória	II
Agradecimentos	III
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIações E SIMBOLOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Soldagem na indústria metroferroviária	17
3.2.1 Processos de soldagem MIG/MAG e TIG	19
3.2.2 Solda por resistência.....	21
3.3.2 Aço carbono e aço carbono baixa liga.	24
3.4 Soldagem do aço AISI 301L.....	25
3.4.1 Regiões da junta soldada.....	25
3.5 Descontinuidades na junta soldada	29
3.6.1 Ensaios não destrutivos	30
3.6.2 Ensaios destrutivos	34
3.6.2.2	34
3.6.2.	35
3.7 Reparo por soldagem em juntas soldadas.....	36
3.8 Trincas na soldagem	40
3.9 Corrosão em aços inoxidáveis.....	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1 Materiais.....	44
4.2 Procedimento experimental.....	44
4.2.1 Preparação da junta	44
4.2.2 Execução da soldagem MIG	45
4.2.3 Execução do reparo TIG da face do cordão.....	46
4.2.5 Corte e preparação das amostras	49

4.3.1 Análise dimensional	53
4.3.3 Caracterização microestrutural.....	56
4.3.4. Ensaio de suscetibilidade a corrosão intergranular	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1 Ensaios não destrutivos	58
5.1.1 Inspeção visual.....	58
5.1.2 Ensaio por Líquidos Penetrantes	59
5.1.3 Análise dimensional	60
5.2 Ensaios Destrutivos.....	62
5.2.1 Ensaio de tração	62
5.3.2 Ensaio de microdureza Vickers	66
5.3.3. Ensaio de fadiga.....	67
5.3.4 Caracterização microestrutural.....	69
6. CONCLUSÕES	84
7. Bibliografia.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) a (e) Imagens de vagões e seus componentes estruturais e (f) indicação da descontinuidade de sobreposição – Fonte: Autor	18
Figura 2: Equipamento para soldagem MIG-Fonte: Instituto Edubras,2009 ⁽⁴⁾	19
Figura 3: Representação esquemática do equipamento para soldagem TIG – Fonte: Senai Varginha (Apostila de soldagem) (2004) ⁽⁵⁾	20
Figura 4: Representação esquemática de soldagem por resistência –	21
Figura 5: Diagrama esquemático dos diferentes modos de solidificação. Adaptado - Fonte: M.D. Neves ⁽¹⁴⁾	26
Figura 6: Diagrama de Schaeffler com marcação do Cr_{eq} e Ni_{eq} dos aços AISI 301 e 308– Fonte: Adaptado do Grupo Labmat ⁽¹⁷⁾	27
Figura 7: Diluição (D) em junta soldada, onde A = Área do MB fundida, B = Área depositada do MA. Fonte: Infosolda ⁽²⁰⁾	28
Figura 8: Descontinuidades de soldagem, as setas indicam o local da respectiva descontinuidade. Fonte: Adaptado da norma AWS D1.1 ⁽²⁸⁾	31
Figura 9: Representação esquemática - (a) desalinhamento e (b) embicamento.	32
Figura 10: Dimensão da altura do reforço que deve ser inferior a 3 mm – Adaptado da fonte: AWS D1.1 ⁽²⁸⁾	33
Figura 11: Ângulo excessivo de reforço (a) normal e (b) excessivo – Fonte: Senai Nadir Dias de Figueiredo -1998 (36)	36
Figura 12: Esquemático do processo de reparo por refusão sem metal de adição.	40
Figura 13: Representação esquemática da sensitização na ZAC de uma região de soldagem ⁽⁵⁹⁾	43
Figura 14: Aço austenítico contendo 16%Cr-0,03%C- Fonte: W.E. Mayo ⁽⁶⁰⁾	43
Figura 15: Equipamento de soldagem a arco elétrico (MIG/MAG e TIG). Fonte: Autor	45
Figura 16: Parâmetros principais utilizados na soldagem com o processo MIG. .	45
Figura 17: Cordão de soldagem obtido na soldagem MIG. Fonte: Autor	46
Figura 18: Especificação do Processo de reparo usando a soldagem TIG.....	46

Figura 19: Juntas soldadas; (a) 1 a 6; (b) 7 a 12; (c) 13 a 18 e (d) 19 a 24.	48
Figura 20: (a) imagem da realização da limpeza da junta soldada por meio da utilização de escova de aço e (b) realização de ensaio de inspeção visual com auxílio de iluminação artificial (lanterna).....	49
Figura 21: Ensaio de L.P. na face do cordão-(a) aplicação do líquido penetrante, (b) remoção do líquido penetrante, (c) aplicação do líquido revelador e (d) secagem do líquido revelador.	50
Figura 22: Ensaio L.P. da raiz do cordão (a) aplicação do líquido penetrante e (b) aplicação do revelador.	50
Figura 23: (a) geometria e dimensões das amostras a serem cortadas com feixe laser com base na norma ASTM E 8M 90 e (b), (c), (d) e (e) imagens das juntas cortadas com feixe laser, respectivamente, da junta 1, junta 2, junta 3 e junta 4.	51
Figura 24: (a) Marcação numérica das amostras por meio de microrretífica e (b) geometria da amostra para ensaio de tração e fadiga com indicação do cordão de solda na região central da amostra.	52
Figura 25: (a) medição da altura do cordão; (b) medição da largura do cordão... ..	53
Figura 26: (a) Detalhe da operação de fresagem e (b) amostra de tração/fadiga com reforço de soldagem e sem reforço removido por fresamento.	55
Figura 27: (a) máquina de ensaio de fadiga e (b) tela com dados durante o ensaio.	56
Figura 28: Relatório gerado a partir de inspeção visual (IV) das juntas soldadas e com a realização de reparo.	58
Figura 29: Relatório de inspeção por líquidos penetrantes (LP) das juntas soldadas e submetidas ao reparo.	59
Figura 30: Inspeção por L.P. após a aplicação do revelador; (a) imagem na face submetida ao reparo TIG e (b) imagem da na raiz sem a realização de reparo... ..	60
Figura 31: Curva representativa da carga aplicada X deslocamento no teste de tração da amostra 6 (junta 1).	62
Figura 32: Ruptura das amostras (a) com reforço e (b) sem reforço em relação a quantidade de reparos (refusões).	64
Figura 33: Alongamento das amostras (a) com reforço e (b) sem reforço em relação a quantidade de reparos (refusões).....	64
Figura 34: Amostras com reforço (a) e (b) com fratura no MB, longe da região de soldagem.....	65
Figura 35: Amostras sem reforço (a) e (b) com fratura na ZF ou na interface ZF e ZAC (junta 5).	65

Figura 36: Perfil de microdureza Vickers em relação à distância (mícrons) nas diversas juntas e regiões soldadas.	67
Figura 37: Macrografias da seção transversal - (a) junta 1 sem reparo; (b) junta 2- com 1 reparo; (c) junta 3 com 2 reparos e (d) junta 4 com 3 reparos.....	70
Figura 38: (a) e (b) Imagens obtidas por microscopia óptica do MB com destaque para o contorno de grão austenítico – (a) ataque eletroquímico com ácido oxálico, (b) ataque eletroquímico com ácido nítrico.....	71
Figura 39: MB com indicação de linhas de ferrita ao longo da conformação. Imagens obtidas por (a) microscopia óptica e (b) microscopia eletrônica de varredura.....	72
Figura 40: Imagem obtida por microscopia óptica da interface (ZF), (ZL) e (ZAC). (a) junta 1, (b) junta 2; (c) junta 3; (d) junta 4.	73
Figura 41: Imagem obtida por MEV com difratograma de elementos do MS obtido por EDS com pontos de medição da matriz (a) e região vermicular (b).	74
Figura 42: Imagem obtida por MO do centro ZF com destaque para morfologia vermicular da ferrita δ . (a) junta 1; (b) junta 4.....	75
Figura 43: Imagem obtida por MEV do centro ZF (a) e (c) junta 1 e (b) e (d) junta 4	76
Figura 44: Imagens obtidas por MEV da região da face da ZF - (a) condição 2, (b) condição 3 e (c) e (d) condição 4.	77
Figura 45: Orientação dos grãos para área de extração de calor (a). Descontinuidades localizadas na raiz do cordão, (b), (c) e (d) imagens obtidas por microscopia óptica da interface (ZF) / (ZAC); (e) e (f) imagens obtidas por MEV.	78
Figura 46: Imagem obtida por MEV da região de reparo na raiz - (a), (b) e (c) junta 2 com 1 reparo da raiz e (d) junta 3 com 2 reparos da raiz.	79
Figura 47: Imagem obtida por MEV das zonas de ligações (a) e (b) junta 1 e (c) e (d) junta 4.	80
Figura 48: Imagens obtidas por microscopia óptica, (a) e (b) interface ZF/ZAC. Ataque eletroquímico com ácido oxálico.	81
Figura 49: imagens obtidas por microscopia ótica, (a), (b), (c) e (d) região da ZAC. Ataque eletroquímico com ácido oxálico.	82
Figura 50: Imagem obtida por MEV; (a) e (e) fratura da ZF; (b),(c), (d) e (f) imagem da ZF com a presença de microcavidades (“dimples”).....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química dos aços AISI 301L e 304 L	23
Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços AISI 301 L e 304 L.	24
Tabela 3: Propriedades mecânicas das classes do aço AISI 301L resultantes do processo de encruamento.	24
Tabela 4: Composição química do MB e do MA (% em peso).	44
Tabela 5: Mapeamento geral do número da amostra em relação à soldagem e aos reparos com aos ensaios não destrutivos IV (inspeção visual) e LP (líquido penetrante) realizados.	54
Tabela 6: Dimensão da largura dos cordões [mm] e médias com desvio padrão.	61
Tabela 7: Dimensão da altura dos cordões (reforço) em [mm] e ângulo de reforço (θ) em graus.	61
Tabela 8: Resultados obtidos no ensaio de tração em relação a condição da junta e da amostra com reforço (c/ reforço) e sem reforço (s/ reforço), local de ruptura e resistência mecânica.	63
Tabela 9: Resultados dos valores médios alcançados no ensaio de fadiga em relação à condição da junta e da amostra.	68
Tabela 10: Valores médios da porcentagem de ferrita δ na ZF.	75

LISTA DE ABREVIações E SIMBOLOS

CP	Corpo de Prova
Cr _{eq}	Cromo equivalente
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem
G	Gradiente de temperatura
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
LP	Líquidos Penetrantes
MA	Metal de Adição
MAG	Metal Active Gas
MB	Metal Base
MS	Metal de solda
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG	Metal Inert Gas
MO	Microscopia Óptica
Ni _{eq}	Níquel equivalente
R	Velocidade de crescimento
TIG	Tungsten Inert Gas
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona Fundida
ZL	Zona de ligação

1. INTRODUÇÃO

O setor metroferroviário vem crescendo e tendo seu lugar de destaque no atual panorama de desenvolvimento no país. A maior necessidade de locomoção das pessoas nas grandes metrópoles brasileiras e o advento de eventos como, a copa do mundo e jogos olímpicos torna necessário oferecer a população, meios de transporte rápidos e seguros espelhando-se em grandes cidades do mundo, nas quais o transporte por trilhos é a grande solução para os problemas de locomoção.

Nos últimos anos, esta condição atraiu para o Brasil, além da Alstom Transportes, a necessidade de instalação de outras grandes empresas como a CAF Brasil Indústria Comércio S.A, Bombardier Transportation e Siemens LTDA, todas responsáveis pela fabricação de novas unidades de vagões para o Metro de São Paulo e para a CPTM (Companhia Paulista de Trens Metropolitanos). Estas empresas também são responsáveis pela modernização da atual frota paulistana, pois junto com outras empresas em forma de consórcios aquecem a economia, geram empregos e fortalecem as empresas que já atuavam neste setor. Tal demanda inclui também a aquisição de trens fabricados no exterior e também a inovação em conceitos de transporte, como é o caso do monotrilho que consiste no transporte em vias elevadas a ser fabricado no Brasil pela Bombardier.

No segmento ferroviário a soldagem é um processo de fabricação extremamente importante na montagem e fabricação das estruturas de diversos componentes dos vagões. As juntas soldadas usadas neste setor devem possuir elevadas propriedades de desempenho e, portanto, devem atender diversos requisitos impostos pelo setor.

Neste trabalho é realizado um estudo específico, referente a presença e a eliminação de descontinuidades, que surgem na junta soldada durante o processo de fabricação. As descontinuidades em juntas soldadas podem ser de grande incidência no setor metroferroviário e, por diminuírem as propriedades mecânicas dificultam a aprovação da junta segundo normas empregadas no setor.

Uma forma de eliminar estas descontinuidades, visando a utilização dos componentes, é empregar o reparo executado por soldagem na junta. A opção de

se utilizar estes reparos apresenta maior viabilidade econômica, pois pode recuperar e reaproveitar a junta que tenha sido reprovada sem a substituição do componente.

O reparo em juntas pode ser realizado por refusão de uma região do cordão de solda, por uma ou mais vezes, visando à correção ou eliminação das descontinuidades podendo provocar alteração da geometria do cordão.

A necessidade deste estudo vem de encontro à rotina empregada na fabricação de vagões em aço inoxidável, onde as soldas reprovadas são reparadas com o processo TIG. Uma junta soldada com descontinuidade pode sofrer um ou mais reparos consecutivos até a eliminação da descontinuidade e, apesar da condição de reparos consecutivos não ser uma regra, não se pode descartar esta possibilidade dentro do processo de fabricação. Portanto uma junta soldada pode sofrer diversos reparos, significando a aplicação de vários ciclos térmicos nesta área e ocasionando a mudança do perfil da solda, em especial do reforço do cordão, possibilitando a alteração da microestrutura e modificação de propriedades mecânicas da junta. Portanto, a análise do comportamento mecânico e microestrutural dos componentes submetidos ao reparo por soldagem deve ser realizada para avaliar, se as propriedades de desempenho das juntas estão sendo mantidas, em relação às juntas sem reparo.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico e caracterizar a microestrutura das juntas em aço inoxidável AISI 301 L, soldadas pelo processo MIG e posteriormente, submetidas ao processo de reparo por uma ou mais refusões do cordão utilizando o processo TIG.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Soldagem na indústria metroferroviária

A soldagem tem vital importância para o setor metroferroviário. Diversos processos de soldagem são usados, praticamente, em todas as etapas da confecção de vagões. Os vagões podem ser destinados para transporte de carga confeccionados na totalidade em aço carbono, normalmente, de menor custo ou vagões para transporte de passageiros, onde a estrutura em sua maior parte é composta de aço inoxidável, portanto de maior custo associado.

A estrutura do vagão é de relevante importância, pois é dimensionada para suportar o peso dos passageiros, que em horários de pico de funcionamento pode chegar a dez passageiros por metro quadrado ⁽¹⁾, além de também conferir rigidez estrutural ao vagão. A estrutura é montada por meio de soldagem de componentes, que deve também sustentar os diversos componentes para o perfeito funcionamento do trem.

Entre os componentes podem-se mencionar: aparelhos de ar condicionado, portas, bancos, armários elétricos, dutos de ar situados na parte interna do vagão, equipamentos elétricos do sistema de tração (transformadores, conversores, controladores), sistemas pneumáticos (reservatórios de ar, tubulações, válvulas e outros componentes) instalados sob o estrado do vagão. Portanto, o peso dos passageiros deve ser somado ao peso dos componentes e da estrutura e por fim devem ser considerados, os esforços cíclicos combinados pelos carregamentos, que são intensificados pela condição do trem em movimento com constantes ciclos de aceleração e frenagem.

Nas figuras 1a, 1b, 1c e 1d são mostrados detalhes da fabricação de vagões metroferroviários confeccionados em aço inoxidável, enquanto na figura 1e e 1f são apresentados suportes de aço inoxidável soldados localizados sob o estrado do vagão. Na figura 1f é mostrada uma união com um detalhe típico de descontinuidade na junta soldada.

(a): Vagão metroviário aço inoxidável

(b): Etapa da fabricação do estrado

(c): Vista interna da estrutura do vagão

(d): Vista frontal (cabeceira) do vagão

(e): Suporte de aço inoxidável sob o estrado.

(f): Vista da junta soldada com indicação da descontinuidade “sobreposição”

Figura 1: (a) a (e) Imagens de vagões e seus componentes estruturais e (f) indicação da descontinuidade de sobreposição – Fonte: Autor

3.2 Processos de soldagem usados na fabricação de vagões metroferroviários

Atualmente, os processos de soldagem a arco são os mais empregados na fabricação de componentes estruturais de vagões de aço inoxidável, entre eles destacam-se: MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) ou GMAW (Gas Metal Arc Welding) e TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). A soldagem por resistência também é um processo muito utilizado nas áreas de acabamento, por sua elevada produtividade e padronização. Seguindo os rumos de inovação tecnológica a indústria japonesa tem usado o processo laser ⁽²⁾ na soldagem de vagões em alumínio.

3.2.1 Processos de soldagem MIG/MAG e TIG

Os processos MIG/MAG e TIG utilizam o arco elétrico para gerar calor e promover a fusão dos metais na soldagem. No processo MIG/MAG o eletrodo (arame) é consumível e sem revestimento (eletrodo nu). A proteção da soldagem é executada por um fluxo de gás inerte, neste caso o processo é denominado MIG ⁽³⁾ sendo normalmente usado nas soldagens dos aços inoxidáveis. Nas soldagens de aço carbono a proteção é realizada por meio de gás ativo, composta da mistura de gás inerte com CO₂ (MAG) ⁽³⁾. Na figura 2 é mostrada uma representação esquemática do processo MIG/MAG.

Figura 2: Equipamento para soldagem MIG-Fonte: Instituto Edubras,2009 ⁽⁴⁾

No caso do processo TIG emprega-se na soldagem um eletrodo nu de tungstênio, não consumível e com proteção da soldagem sendo realizada utilizando-se um fluxo de gás inerte, direcionado à junta soldada pela tocha de soldagem conforme ilustrado na figura 3. No caso da necessidade de deposição

de material esta deve ser realizada, por meio de uma vareta de material de adição (MA) inserida na região do arco elétrico.

Figura 3: Representação esquemática do equipamento para soldagem TIG –
Fonte: Senai Varginha (Apostila de soldagem) (2004) ⁽⁵⁾

O processo MIG/MAG propicia uma soldagem que pode ser automatizada ou semiautomatizada e possibilita uma elevada taxa de deposição de 1 a 15 Kg/h, enquanto o processo TIG ⁽³⁾ pode ser realizado sem deposição de material ou com adições de até 1,5 kg/h. Portanto a produtividade do processo MIG/MAG é maior em relação ao processo TIG. A elevada produtividade, a possibilidade de automatizar a soldagem e o maior controle do processo faz do processo MIG/MAG, bastante adequado para soldagens no setor metroferroviário e atualmente, também, vem substituindo as soldagens até então realizadas com o processo eletrodo revestido.

As juntas com soldagem de filete ou de topo são executadas por MIG/MAG, em diversos componentes metroferroviários, conforme observado na figura 1. Alguns exemplos destas junções ocorrem nas estruturas: cabeceiras do vagão com a extremidade das laterais, união das laterais com o estrado, soleiras das portas com a viga lateral, suportes das luminárias com a cobertura, suportes dos bancos com o estrado, suportes abaixo do estrado, montantes de colisão com a cabeceira, cabeças de estrado com as vigas laterais e em outros componentes.

O processo TIG além de ser usado na soldagem de aços inoxidáveis de componentes de pequena espessura, também pode ser utilizado no reparo de juntas soldadas com o processo MIG/MAG, que porventura apresentem descontinuidades durante o processo produtivo.

3.2.2 Solda por resistência

O processo por resistência ⁽³⁾ é usado na fabricação de juntas sobrepostas onde são realizadas soldas em um ou mais pontos, por meio do calor gerado pela passagem de corrente elétrica nos materiais de base (MB), simultaneamente, ocorre a aplicação de pressão pelos eletrodos. O calor é gerado por efeito Joule, portanto, pela resistência elétrica do conjunto à passagem de corrente. Um pulso elétrico de curta duração, baixa tensão e alta corrente elétrica funde a região de contato de maior resistência elétrica dos materiais de base. A pressão dos eletrodos é mantida após o término do fluxo de corrente ⁽³⁾ ⁽⁶⁾. Na figura 4 é ilustrado o processo de soldagem por resistência elétrica.

Figura 4: Representação esquemática de soldagem por resistência –
Fonte: Site Infosolda - 2004 ⁽⁷⁾

Diversos componentes no setor metroferroviário são soldados por resistência, entre eles podem-se destacar as junções de: cambotas da cobertura nos corrugados, corrugados com as pingadeiras, cobertura com as laterais, montantes laterais com os painéis laterais, laterais com os batentes das portas e outros. Portanto, as soldas de característica estética cujos componentes ficam

expostos à visão dos usuários são realizadas em grande parte pelo processo de soldagem por resistência elétrica.

3.3 Materiais usados na fabricação de vagões metroferroviários

3.3.1 Aços inoxidáveis

O aço inoxidável é uma liga de ferro cromo e níquel, podendo conter também outros elementos de liga que propiciam adequadas propriedades mecânicas, além de alta resistência à oxidação e a corrosão. As propriedades de corrosão são alcançadas pelo fenômeno de passivação, que ocorre espontaneamente, quando há presença de cromo e oxigênio, formando uma camada passiva muito estável, aderente e contínua presente em toda a superfície do aço que bloqueia a ação do meio corrosivo. Outras propriedades tais como alto brilho e elevado acabamento da superfície são necessários por razões estéticas.

Os aços inoxidáveis são classificados segundo a sua microestrutura em: ferríticos, austeníticos, martensíticos, endurecíveis por precipitação e duplex.

A classificação de aços inoxidáveis é encontrada nas seguintes normas: ASTM A-240A ⁽⁸⁾ (para aços austeníticos e ferríticos) e ASTM A-176 ⁽⁹⁾ para aços martensíticos).

Os aços inoxidáveis austeníticos não são magnéticos, são considerados dúcteis e apresentam boa soldabilidade, sendo a maior família em termos do número de ligas e de utilização ⁽⁶⁾. Os austeníticos não podem ser endurecidos por tratamento térmico, tendo o nível de teor de carbono restrito, mas adições principalmente de níquel mudam a microestrutura na temperatura ambiente. Dependendo do teor de níquel, os aços austeníticos respondem ao trabalho a frio com aumento da resistência mecânica, podendo ser utilizado em operações severas de conformação, evitando ruptura prematura e trincas.

Os vagões metroferroviários são confeccionados em sua maior parte em aços inoxidáveis austeníticos da série 300, em consequência de sua alta resistência a corrosão, adequada soldabilidade e elevado grau de acabamento da superfície. Em relação ao uso dos aços inoxidáveis, o aço AISI 304 é o mais utilizado na indústria, mas no caso específico da indústria de vagões, o aço AISI 301L é o mais usado, pois propicia maior resistência ao desgaste em consequência da maior dureza e menor custo do que o AISI 304.

O aço inoxidável AISI 301 é também o mais utilizado na fabricação de vagões de passageiros, em consequência de sua alta ductilidade o que lhe confere boa conformação mecânica, elevadas propriedades mecânicas da junta soldada e menor custo em relação ao AISI 304. A fabricação de vagões metroferroviários ocorre com uso de chapas de aço inoxidável com espessura de até 6,0 mm, em especial, para atender operações de dobra, que são características dos componentes usados nos vagões. Na tabela 1 são apresentadas as composições químicas nominais dos aços austeníticos AISI 301 L e 304 L.

Tabela 1: Composição química dos aços AISI 301L e 304 L

Composição Classificação	C	Mn	Si	Ni	Cr	Fe
AISI 301-L	0,03	2,00	1,00	6,00-8,00	16,00-18,00	Bal.
AISI 304-L	0,03	2,00	0,75	8,00-13,00	18,00-20,00	Bal.

Fonte ASTM A-666 (10)

No caso do aço 301 L, a letra "L" após o tipo de aço inoxidável significa que o teor de carbono na liga é no máximo de 0,03%, enquanto os níveis normais de carbono são de 0,08 % máximo e em algumas ligas pode atingir 0.15 % máximo. O baixo teor de carbono ajuda a prevenir a precipitação de cromo (formando carbonetos de cromo na região da solda), no entanto é requerido um mínimo de 10,5% de cromo na matriz para facilitar a formação e estabilização de um filme passivo que proporciona ao aço inoxidável elevada resistência à corrosão.

O menor teor de níquel usado no AISI 301 L diminui a estabilidade da austenita, permitindo o aparecimento de martensita induzida por deformação a frio, conseguindo-se assim excelentes propriedades para aplicações estruturais, tendo grande utilização em componentes da indústria ferroviária (vagões de trens metropolitanos).

Na tabela 2 indica-se uma comparação entre as principais propriedades mecânicas dos aços AISI 301 L e 304 L.

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços AISI 301 L e 304 L.

Propriedades Material	Tensão de Ruptura (Mpa)	Tensão de Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)	Dureza HV
AISI 301 L (Nominal) ¼ duro	825	515	25	266
AISI 304 L ¼ duro	860	515	10	201

Fonte ASTM A 666 (10)

Na norma ASTM A 666 ⁽¹⁰⁾ está definida a classificação existente para as propriedades mecânicas resultantes da combinação da composição química e do grau de endurecimento por encruamento usado para o aço AISI 301. Dados obtidos desta norma estão mencionados na tabela 3 para as seguintes classes: aços no estado recozidos, 1/16 duro, 1/8 duro, 1/4 duro e 1/2 duro.

Tabela 3: Propriedades mecânicas das classes do aço AISI 301L resultantes do processo de encruamento.

Propriedades AISI 301L	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento %	Dureza Vickers (HV)
Recozido	550	220	45	241
1/16 Duro	690	345	40	*
1/8 Duro	760	415	35	*
1/4 Duro	825	515	25	266
1/2 Duro	930	690	20	318

Fonte ASTM A 666 (10) * Valor não disponível na norma ASTM A 666

3.3.2 Aço carbono e aço carbono baixa liga.

O aço carbono é uma liga formada por ferro e carbono. O teor de carbono varia de 0,008 a 2,11 %. Os aços carbono baixa liga possuem até 5 % de elementos de liga, o que garante melhor comportamento mecânico em relação ao aço carbono. Dependendo da porcentagem de carbono e dos teores dos elementos de liga diversas propriedades mecânicas podem ser obtidas, em

especial pelo refino de grão e endurecimento por precipitação, o que possibilita inúmeras aplicações no setor metroferroviário.

Os aços carbono de baixa liga ASTM A 283 ⁽¹¹⁾, A 570 ⁽¹²⁾ e A 380 ⁽¹³⁾ são usados na fabricação das cabeças de estrado dos vagões. Outros componentes considerados críticos no projeto dos vagões também são confeccionados em aços carbono baixa liga, como por exemplo: montantes de colisão, engates, as barras de união entre carros e truques. Estes componentes são submetidos às elevadas solicitações mecânicas de diversas espécies.

3.4 Soldagem do aço AISI 301L

3.4.1 Regiões da junta soldada

Na soldagem MIG do aço inoxidável AISI 301 L, como em outros aços, acontece a formação de uma junta com diversas regiões, são elas: zona de fusão (ZF) ou metal de solda (MS), zona de ligação (ZL) e zona afetada pelo calor (ZAC). Na junta soldada em razão da variação de temperatura em relação à distância e ao tempo, ocorrem diferentes gradientes de temperatura, além de velocidades distintas de solidificação e de resfriamento que provocam diversas transformações na microestrutura da junta soldada.

3.4.1.1 Zona fundida (metal de solda)

O processo de solidificação na ZF ocorre pelos mecanismos de nucleação e crescimento de novas fases, a partir da interface sólido/líquido. O início de solidificação da zona de fusão pode acontecer de três formas distintas, respectivamente, nucleação homogênea, nucleação heterogênea e crescimento epitaxial, que dependem do ângulo de molhamento ⁽¹⁴⁾.

Após iniciada a solidificação, o crescimento dos grãos prossegue na direção paralela ao máximo gradiente de temperatura no sentido oposto a direção de extração de calor, o que favorece um crescimento competitivo de grãos. Os grãos com orientação favorável à direção do máximo gradiente de temperatura apresentam maior velocidade de crescimento, em relação aos grãos, que coincidem com direções menos favoráveis ao crescimento.

A morfologia de solidificação da zona de fusão (ZF) é controlada basicamente pelo grau do super-resfriamento constitucional, que depende dos

parâmetros: gradiente térmico, velocidade de solidificação e concentração de soluto na fase sólida e líquida (S-L). O gradiente térmico (G) é definido como a variação da temperatura no líquido, em relação à distância, a partir da interface sólido-líquido (S-L). A velocidade de solidificação (R) está relacionada ao avanço da interface sólido-líquido e esta, por sua vez depende da variação na temperatura “líquidus”.

Diferentes modos de solidificação provocando diferentes morfologias podem ocorrer na ZF, tais como: planar, celular, celular dendrítico, colunar dendrítico e dendrítico equiaxial. A morfologia de solidificação depende dos parâmetros G e R das relações G e R , $G.R$ e G/R , além da composição inicial da liga. Na figura 5a é mostrado o diagrama esquemático dos diferentes modos de solidificação para a relação $G/\sqrt{R}$ e na Figura 5b é verificada, a região de super-resfriamento constitucional em relação ao gradiente de temperatura.

Figura 5: Diagrama esquemático dos diferentes modos de solidificação. Adaptado - Fonte: M.D. Neves ⁽¹⁴⁾

O super-resfriamento constitucional ocorre na solidificação de uma liga, em razão da composição química da fase sólida ser diferente da composição química da fase líquida. A solubilidade do soluto na fase sólida é menor do que na fase líquida. Portanto, existe um gradiente de concentração de soluto da interface sólido-líquido para o metal líquido. A variação de concentração de soluto provoca uma diminuição da temperatura líquidus, facilitando a solidificação numa direção, contribuindo para um super-resfriamento constitucional a partir da interface (S-L).

A morfologia da microestrutura da zona de fusão pode ser diferente nos diversos aços inoxidáveis. Esta morfologia pode ser prevista pelo diagrama de Schaeffler mostrado na figura 6, pelo cálculo dos valores de cromo equivalente (Cr_{eq}) e níquel equivalente (Ni_{eq}) do metal de base e do metal de adição. Portanto, pode-se prever a microestrutura e as fases presentes em condições de equilíbrio resultante desta combinação. Os elementos químicos são agrupados em elementos estabilizantes da ferrita e da austenita, para calcular respectivamente, as porcentagens de cromo e níquel equivalentes ⁽¹⁵⁾, conforme relações a seguir:

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

$$Ni_{eq} = \%Ni + 0,5 (\% Mn) + 30 (\% C) + 25(\%N) + 0,3(\% Cu) \quad (2)$$

Os elementos como o Cr, Mo, e Nb são elementos que tendem a favorecer a formação de ferrita ⁽¹⁶⁾, enquanto que o C, Ni, Mn e N estabilizam a formação da fase austenítica.

Figura 6: Diagrama de Schaeffler com marcação do Cr_{eq} e Ni_{eq} dos aços AISI 301 e 308– Fonte: Adaptado do Grupo Labmat ⁽¹⁷⁾

Uma fase importante encontrada na soldagem do aço AISI 301L é a ferrita δ que é uma fase dúctil, tem comportamento ferromagnético, sua estrutura

cristalina é CCC e ocorre em aços inoxidáveis austeníticos em condições onde há um processo de resfriamento rápido, como na soldagem. Portanto não há tempo suficiente para a ferrita δ se transformar em austenita. Esta fase quando presente em pequenas proporções propicia uma contribuição importante e benéfica na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, pois reduz a tendência ao aparecimento de trincas a quente⁽¹⁸⁾.

A diluição da solda⁽¹⁹⁾ é a porcentagem do metal de base que sofre fusão, passando a compor a zona fundida. A diluição (D) é calculada pela área do metal de base fundido (A) dividido pela área total da ZF (A + B), conforme mostrado na equação 3 e na figura 7.

$$D(\%) = \frac{A}{(A + B)} \times 100 \quad (3)$$

Figura 7: Diluição (D) em junta soldada, onde A = Área do MB fundida, B = Área depositada do MA. Fonte: Infosolda⁽²⁰⁾

As composições químicas do metal de adição e do metal de base são inseridas no diagrama de Schaeffler pela marcação dos pontos de Cr_{eq} e Ni_{eq} , como mostrado na figura 6 para os aços AISI 301 e 308. Estes dois pontos são unidos formando um segmento de reta, que é dividido em 10 partes, onde é marcada a porcentagem de diluição da condição de soldagem. A partir da marcação da diluição no segmento de reta, estima-se a porcentagem das fases presentes na zona fundida dos aços inoxidáveis.

A diluição na junta pode ser observada por macrografias por contraste do MA com o MB, entretanto, quando há necessidade de análises mais precisas da porção diluída são usadas técnicas mais apuradas como a “Medição de diluição da soldagem por ativação de contorno”⁽²¹⁾, que utiliza de um estereoscópio e auxílio de um programa de linguagem de programação C++ como interface. A

diluição influencia a homogeneidade da zona de fundida, portanto altera propriedades mecânicas e resistência a corrosão.

3.4.1.2 Zona de ligação

Zona de ligação (ZL) é a região da junta compreendida entre a zona afetada pelo calor e a zona fundida (ZF). A zona de ligação é facilmente identificada nas micrografias de juntas soldadas, em especial no caso de chapas laminadas, onde há um alinhamento contínuo dos grãos, podendo ser identificada pela linha que demarca o início da diferença no alinhamento destes grãos que contrasta com a morfologia desordenada do metal de solda. Na zona de ligação dos aços inoxidáveis austeníticos pode ocorrer fusão no contorno de grão, favorecendo a formação de trincas a quente. A utilização do MA com composição química diferente do MB pode dificultar o crescimento epitaxial.

3.4.1.3 Zona Afetada pelo Calor

Nesta região a temperatura proveniente do processo de soldagem não é suficiente para fundir o metal, porém ocorrem transformações microestruturais em estado sólido, que podem alterar as propriedades mecânicas da junta dos aços inoxidáveis austeníticos. Na ZAC ocorrem transformações tais como, aumento do tamanho de grão, recristalização, recuperação, formação e coalescimento de precipitados e transformações de fase. Nesta região, além da diferença do tamanho de grão pode ocorrer também a presença de fases indesejáveis, tais como, martensita nos aços carbono e precipitados de cromo nos aços inoxidáveis, estes fenômenos estão relacionados a velocidade de resfriamento.

3.5 Descontinuidades na junta soldada

A soldagem é uma atividade que deve ser padronizada empregando-se uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS). A EPS é um roteiro de todas as atividades pertinentes à soldagem, visando a aprovação da junta. Apesar de todos estes cuidados, envolvendo a utilização de uma EPS, ainda pode ocorrer o aparecimento de descontinuidades durante ou após a realização da soldagem.

Lembrando que, a Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) é um procedimento escrito e qualificado das informações do processo de execução

da soldagem, que contém todos os parâmetros de soldagem empregados na qualificação do processo e do soldador.

A presença de descontinuidades pode ocasionar a reprovação de uma junta soldada. As descontinuidades mais comuns encontradas passíveis de serem submetidas ao reparo por soldagem no segmento metroviário, em cada região da junta são:

- na zona fundida (ZF) podem ocorrer sobreposições, porosidades, falta de fusão e convexidade (ângulo) excessiva do cordão de solda, inclusões, trincas de solidificação.
- na zona de ligação (ZL) podem ocorrer mordeduras, falta de fusão que pode também ser ocasionada na maioria das vezes pela limpeza incorreta do MB, trincas de liquação, fissuração por perda de ductilidade.
- Na zona afetada pelo calor (ZAC) pode ocorrer fissuração por hidrogênio associada a microestruturas de elevada dureza e baixa tenacidade e tensões residuais de tração conhecidas também como trincas a frio.

3.6 Controle de qualidade na soldagem no setor metroferroviário

Diversos ensaios não destrutivos e destrutivos são realizados nas juntas do setor metroferroviário, de acordo com requisitos impostos por normas do setor. Nas normas AAR S 046 ⁽²²⁾, GM/RT2100 ⁽²³⁾ e EM 12663 ⁽²⁴⁾ são especificados procedimentos e requerimentos estruturais para fabricação de vagões.

3.6.1 Ensaios não destrutivos

As juntas soldadas no segmento metroferroviário são submetidas aos ensaios não destrutivos, de acordo com seu aspecto crítico, ou o grau de importância da junta na estrutura do vagão. O grau de importância está relacionado à junta ser crítica ou não crítica, que está ligado à importância e a intensidade dos esforços aos quais estão submetidas as juntas. Por exemplo, a solda da lateral com a cobertura no vagão metroferroviário é considerada crítica, e uma solda que fixa uma luminária é considerada não crítica, não sendo avaliadas da mesma forma. No entanto, todas as uniões são importantes, mas os requisitos e os cuidados são maiores no caso das juntas com soldas críticas.

Em relação aos ensaios não destrutivos, a inspeção visual é realizada em

100% das juntas soldadas consideradas críticas e não críticas. O ensaio por líquidos penetrantes ⁽²⁵⁾ é realizado apenas nas juntas consideradas críticas. O ensaio de partículas magnéticas ⁽²⁶⁾ (no caso das estruturas em aço carbono e ligas ferromagnéticas) e o ensaio por ultrassom ⁽²⁷⁾ são usados em juntas onde há dificuldade de visualização do defeito, nestes casos as descontinuidades não são detectadas pela inspeção visual ou por líquidos penetrantes. A radiografia é utilizada em casos específicos, onde os resultados obtidos dos ensaios anteriores apresentam dificuldade e impossibilidade de interpretação ou não são detectados por outras técnicas de avaliação. Na sequência são apresentados os principais ensaios não destrutivos, bem como seus critérios de aprovação.

3.6.1.1 Inspeção visual

A inspeção visual é um ensaio não destrutivo que precede qualquer outro tipo de ensaio e tem como função fazer análises qualitativas e quantitativas em ambiente e condições de iluminação favoráveis, a fim de comparar os resultados com padrões conhecidos. No caso da inspeção de soldagem é comum o uso de fontes auxiliares de iluminação como pendentes ou lanternas, em alguns casos pode-se fazer o uso de lupas de aumento para melhor visualização de possíveis descontinuidades.

Na figura 8 são mostradas representações típicas das principais descontinuidades que podem ser encontradas nas juntas soldadas do setor metroferroviário e observadas por inspeção visual.

Figura 8: Descontinuidades de soldagem, as setas indicam o local da respectiva descontinuidade. Fonte: Adaptado da norma AWS D1.1 ⁽²⁸⁾.

Outras discontinuidades tais como, desalinhamentos e embicamentos, conforme mostrado na figura 9 podem ser observadas na junta soldada. Estas discontinuidades são originadas por desalinhamento dos MB provocada por fixação incorreta dos MB durante o processo de soldagem.

Figura 9: Representação esquemática - (a) desalinhamento e (b) embicamento.
Fonte FBTS ⁽²⁹⁾

Os critérios de aceitação da inspeção visual em juntas são definidos de acordo com o item 6.9 e tabela 6.1 da norma AWS D1.1 ⁽²⁸⁾, e dependem da aplicação (projeto) e da espessura da chapa a ser soldada.

A superfície do metal de base não deve apresentar redução de espessura maior que 1 mm ou 5% da espessura. As juntas soldadas não devem apresentar mordeduras que excedam a 0,25 mm de profundidade. Permite-se a presença de poro isolado até 2 mm de diâmetro e as porosidades devem ter um diâmetro acumulado no máximo de 10 mm, sendo que cada poro não pode exceder a 1 mm de diâmetro e não deve ultrapassar diâmetro acumulado total de 20 mm numa distância de 300 mm.

3.6.1.2 Análise dimensional

Análise dimensional da junta é realizada com o auxílio de instrumentos específicos, sendo necessária durante todo o processo produtivo, a fim de assegurar a precisão geométrica do projeto. Na inspeção de soldagem são utilizados trenas, escalas, paquímetros e calibres de soldas. A altura do cordão denominado por reforço (R) representado na figura 10 para uma junta de topo deve obedecer aos critérios estabelecidos na norma AWS D1.1 item 5.24.4 desta norma e não deve exceder à dimensão de 3 mm.

Figura 10: Dimensão da altura do reforço que deve ser inferior a 3 mm – Adaptado da fonte: AWS D1.1 ⁽²⁸⁾

3.6.1.3 Ensaios por líquidos penetrantes

O ensaio por líquidos penetrantes ⁽²⁵⁾ é um método de inspeção comumente utilizado no ramo industrial em consequência do baixo custo, imediatismo dos resultados, facilidade de transporte e mobilidade na utilização.

O método consiste na aplicação de um líquido colorido de alto contraste na superfície da peça a ser inspecionada, este líquido penetra por efeito de capilaridade nas descontinuidades que afloram à superfície da peça. O fato de ser um método que usa o princípio da capilaridade e não por gravidade, faz desta técnica ideal também para inspeções sobre cabeça, o que é um fator importante para inspeções de equipamentos de grande porte, onde não é possível o manuseio da peça ou do equipamento.

Após a aplicação do líquido penetrante remove-se o excesso por limpeza, permanecendo na peça uma quantidade de líquido penetrada nas descontinuidades. Em seguida aplica-se o revelador de cor contrastante ao penetrante e o líquido impregnado nas descontinuidades aflora à superfície, contrastando de forma a ser percebido visualmente, propiciando a localização da descontinuidade e dimensionamento da indicação.

Os critérios das normas usados para o laudo de aprovação diferem de acordo com a: forma, dimensão e quantidade das indicações. O critério de aceitação é baseado na norma ASME Sec.VIII Div.1 AP.8 ⁽³⁰⁾ aplicável para soldas e componentes inspecionados por líquidos penetrantes. As indicações na superfície aparecem de forma linear ou arredondada. As superfícies inspecionadas não são aprovadas quando apresentam indicações conforme descrito a seguir:

- Indicações lineares com dimensões maiores que 1/16 pol. (1,5 mm), onde indicação linear é aquela que apresenta um comprimento maior que três vezes a sua largura.
- Indicação arredondada maior que 5 mm (é aquela na forma circular ou elíptica com comprimento igual ou menor que três vezes a largura).
- Quatro ou mais indicações com dimensão superior a 1/16" (1,5 mm) arredondadas em linha separadas por 1/16" (1,5 mm) ou menos (de borda a borda).

3.6.2 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos da junta soldada, como por exemplo, os mecânicos (tração, fadiga e dureza) e análise microestrutural são usados na elaboração e homologação da Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS), o que ocorre antes do início do processo produtivo do componente.

3.6.2.1 Microdureza Vickers

A dureza das diversas regiões de uma junta soldada pode variar em relação ao calor e ao ciclo térmico imposto nas regiões submetidas à soldagem. Os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 submetidos à soldagem podem apresentar diferenças no perfil de dureza, em razão das diferenças de temperaturas ⁽³¹⁾, que ocasionam diferentes ciclos térmicos de soldagem e também pelo MB estar no estado encruado. Materiais encruados ao serem soldados em razão do calor imposto na soldagem podem conter regiões com elevação e redução de microdureza. No caso do aço AISI 301 deve ocorrer redução dureza em razão da recuperação e recristalização da junta durante o processo de soldagem.

3.6.2.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração são de relevante importância em estruturas soldadas, em especial para definição da especificação de procedimento de soldagem (EPS). A norma utilizada para o ensaio de tração é a ASTM E 8M 90 ⁽³²⁾. O teste consiste em submeter amostras soldadas nas condições usadas necessárias ao esforço de tração e aplica-se um carregamento que se eleva até o rompimento da amostra. Este teste possibilita mensurar algumas propriedades mecânicas dos

materiais (limite de escoamento, limite de ruptura, alongamento), sendo muito utilizado para caracterizar juntas soldadas e qualificar os procedimentos de soldagem.

3.6.2.3 Ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga⁽³³⁾ consiste em solicitar de forma repetida (cíclica) uma amostra sob determinada tensão, abaixo do limite de ruptura do material. O desempenho de materiais em ensaio de fadiga pode ser caracterizado pela curva de magnitude de tensão (S) por número de ciclos (N) em escala logarítmica.

A forma e a posição da descontinuidade, a tensão residual e os possíveis desalinhamentos provenientes do processo de soldagem são fatores que reduzem à resistência a fadiga. As juntas soldadas são os locais preferenciais para ocorrência de falha por fadiga.

O tipo de junta empregado é um dos fatores que interfere na resistência à fadiga⁽³⁴⁾. Juntas de topo suportam mais ciclos se comparadas às juntas em ângulo (solda de filete), sobreposta e aresta. Outro fator a ser considerado é o sentido do esforço em relação ao sentido da solda, observa-se que os cordões de solda que sofrem esforço longitudinal ao cordão são mais resistentes em relação aos cordões que sofrem esforço transversal⁽³⁵⁾.

A geometria da junta soldada é outro fator estrutural importante no comportamento a fadiga da junta soldada. Em juntas de topo, quanto menor a altura do reforço do cordão de solda maior é a resistência à fadiga, em consequência da menor concentração de tensões, ou seja, quanto maior o reforço do cordão maior é a diferença geométrica entre metal de base e o metal depositado, sendo maior a concentração de tensões nesta região⁽³⁵⁾.

Portanto, na região do reforço concentram-se tensões que influenciam na vida útil do componente. Na região da margem da solda ocorre uma brusca mudança na concordância da face da solda com o MB, em especial, se o reforço do cordão for excessivo, ver figura 11, o que provoca uma intensificação das tensões na junta soldada. O encontro do MB com o reforço da solda (margem) ou com a raiz, no caso de penetração excessiva, provocam as presenças de concentradores de tensão, em consequência da perda de concordância geométrica das superfícies.

Figura 11: Ângulo excessivo de reforço (a) normal e (b) excessivo – Fonte: Senai Nadir Dias de Figueiredo -1998 (36)

A presença de tensões residuais é o resultado de contrações e expansões diferenciadas em consequência das diferentes temperaturas na junta soldada, podendo empenar a mesma se a tensão residual for maior que a tensão de escoamento ou ainda trincar se maior tensão residual for maior que a tensão de ruptura. A nucleação de trincas ocorre com maior frequência na margem da solda (região da junta compreendida pelo encontro do metal de base com o metal depositado) ou em discontinuidades como mordeduras, falta de fusão, concavidade da raiz e penetração excessiva.

Na maioria dos casos no setor metroferroviário, as soldas são mantidas com seu reforço. No caso de um reforço excessivo pode haver a necessidade de sua retirada, entretanto a operação de retirada do excesso de reforço por esmerilhamento também podem inserir tensões residuais. Portanto, é importante usar mão de obra especializada, na qual os soldadores devam executar soldas que não necessitem ser retrabalhadas, ou quando o retrabalho é necessário usar métodos que insiram o mínimo aporte de calor e baixa quantidade de respingos, como é caso do reparo usando processo TIG.

3.7 Reparo por soldagem em juntas soldadas

As juntas soldadas que não são aprovadas, em consequência da presença de alguma discontinuidade podem sofrer um processo de reparo, visando sua aprovação. Na literatura são encontrados diversos estudos sobre o efeito do reparo por soldagem que permitem eliminar pequenos entalhes e possibilitam a criação de uma superfície de maior concordância na junta soldada, por meio da refusão do cordão de solda.

Preciado ⁽³⁷⁾ menciona que o reparo das juntas com o processo TIG, em sua maior parte pode ser realizado sem a utilização de material de adição, com

fusão localizada na própria junta. Neste aspecto, a utilização do processo TIG é bastante viável, por permitir a soldagem sem a utilização ou com pequena quantidade de material de adição (MA), praticamente sem respingos e baixo calor imposto à junta soldada. As propriedades mecânicas obtidas em juntas soldadas, após o reparo por soldagem, devem levar em consideração o comportamento conjunto da zona de fusão e da zona afetada pelo calor, após a execução de algum trabalho de acabamento na região do reparo.

Em outros trabalhos ⁽³⁸⁾ ⁽³⁹⁾ sobre reparo por soldagem, os estudos realizados abordam apenas as técnicas de execução da soldagem não levando em consideração possíveis alterações microestruturais, em consequência do aquecimento, que podem modificar as propriedades mecânicas da junta soldada.

De acordo com os estudos realizados, usando o reparo com processo TIG e submetidas ao ensaio de fadiga foram encontrados melhores resultados nas amostras reparadas por soldagem, em relação às amostras submetidas ao reparo por goivagem (retirada de material de uma determinada região por desbaste ou fusão do mesmo) ou ainda por martelamento. A razão principal é a introdução de menor tensão residual na junta soldada com o uso do processo TIG, se comparado com outros processos de reparo (retrabalho). Assim o reparo por soldagem, apesar de ser um método que introduz calor, propicia melhores propriedades mecânicas ⁽³⁸⁾ ⁽³⁹⁾ à junta.

As estruturas de uma forma em geral estão submetidas a carregamentos com amplitude variável, na qual as tensões podem variar de maneira cíclica, portanto, sofrendo carregamentos por fadiga. Resultados obtidos em estruturas submetidas ao processo de reparo por soldagem TIG indicam um aumento das propriedades de fadiga. Alguns autores ⁽⁴⁰⁾ ⁽⁴¹⁾ mencionam que o processo TIG pode ser uma alternativa para reparos de soldas, em especial, para recuperar somente a área defeituosa, propiciando um aporte térmico menor, sendo este processo eficaz na eliminação de pequenas trincas e defeitos superficiais e dando ao cordão uma geometria mais regular.

No estudo realizado por Albuquerque ⁽⁴²⁾ em tubulações tipo “Riser” de aço API-52-X60 com 16 mm de espessura, utilizado em plataformas de petróleo foi verificado que, o uso do processo TIG na refusão dos reforços das soldas, como meio de eliminação de pequenos defeitos, além de promover um melhor perfil do

reforço das soldas, reduz as tensões residuais introduzidas na junta soldada pelo processo de soldagem por eletrodo revestido ou MAG (GMAW).

Na soldagem de chapas espessas usando vários passes é comum a realização de tratamento térmico de alívio de tensões após a soldagem, o que demanda numa elevação de custo do processo de fabricação. Neste caso, o uso do processo TIG realizando a refusão dos cordões entre passes pode ser considerada uma alternativa viável na eliminação de tensões residuais, uma vez que pode descartar o tratamento térmico após a soldagem ⁽⁴⁰⁾.

Uma alternativa ao reparo por soldagem são os processos de retrabalho usuais usando limas rotativas, discos rotativos e martelamento. No entanto, estes reparos podem inserir tensões residuais na junta e ocasionar pequenos defeitos superficiais muitas vezes não visíveis a olho nu, que associadas às tensões, reduzem a vida útil dos componentes submetidos a fadiga ⁽⁴³⁾.

No estudo realizado por Hildebrand ⁽⁴⁴⁾ é mostrado que o processo TIG é economicamente mais viável que o tratamento térmico de alívio de tensões, mas ainda é considerado mais caro que os processos mecânicos (limas rotativas, discos abrasivos e martelamento) para eliminação de descontinuidades, como o reforço excessivo dos cordões de solda. No entanto, o reparo com o processo TIG elimina defeitos superficiais e subsuperficiais, pois propicia um melhor perfil do reforço da solda e deixa menos tensões residuais em relação aos processos mecânicos de reparo.

Bhaduri ⁽⁴⁵⁾ estuda em seu trabalho, o reparo por soldagem de turbinas de vapor fabricadas com aço inoxidável AISI 316 L usando consumíveis austeníticos e martensíticos. Os resultados obtidos indicam melhor comportamento mecânico, sem apresentar trincas, quando da utilização do AISI 316 L com MA de composição austenítica.

Outra aplicação do reparo com soldagem ocorre em grandes estruturas, no setor de mineração e fabricação de cimento. Desir ⁽⁴⁶⁾ propõe em seu trabalho explicar as razões das falhas internas e externas ocorridas em componentes de mineração submetidos aos esforços de carregamento por fadiga de baixa frequência, além de justificar o método de recuperação realizado por soldagem do ponto de vista técnico e econômico.

O reparo com o processo TIG proporciona um melhor aspecto visual ao cordão e possibilita eliminar com maior rapidez as descontinuidades encontradas. O retrabalho pode ser usado na recuperação de componentes, como também para aumentar a vida útil das juntas soldadas, em especial, por reduzir a quantidade e a atuação dos concentradores de tensões^{(47) (43)}.

A qualidade do retrabalho depende da combinação dos parâmetros de operação e da habilidade do soldador, sendo que este último é um fator de relevância que está relacionado ao tempo de experiência do soldador, pois o processo requer destreza e agilidade para obter sucesso e resultar em juntas com alto índice de confiabilidade⁽⁴⁷⁾.

Segundo Messer⁽⁴⁸⁾, o processo TIG possui o menor custo para aplicações, em relação aos processos com menor taxa de deposição. O retrabalho do cordão também pode ser uma alternativa econômica, em relação ao retrabalho mecânico, como por exemplo, goivagem (esmerilhamento) seguido da execução de novo cordão. Portanto, visando garantir propriedades mecânicas dos componentes que sofram descontinuidades na etapa de fabricação ou durante sua vida útil, o retrabalho com o processo TIG pode ser considerado uma alternativa viável tecnicamente.

A técnica de reparo com processo TIG busca recuperar somente a área defeituosa é um processo muito utilizado para reparos de cordões de solda, sendo eficaz na eliminação de pequenas trincas e defeitos superficiais. Possibilita a obtenção de um cordão com uma geometria mais regular, em especial, quando se busca recuperar uma área defeituosa de maneira ágil e economicamente viável. Portanto, técnica de reparo em juntas soldadas é uma opção usada largamente no cotidiano dos processos de fabricação na qual o setor metroferroviário está incluído.

O reparo por refusão do cordão de solda consiste no uso do processo TIG para fundir a região defeituosa da solda e conferindo a mesma uma nova geometria, mais adequada e reparando os defeitos inseridos na junta em razão da má qualidade do processo de soldagem ou despreparo do soldador na execução do cordão. Na figura 12 é mostrada uma representação esquemática do processo, que auxilia o entendimento do reparo por soldagem.

Figura 12: Esquemático do processo de reparo por refusão sem metal de adição.
Fonte: Autor.

3.8 Trincas na soldagem

A nucleação de trincas no processo de soldagem se deve à incapacidade dos materiais em acomodar às tensões residuais de tração, que são originadas em razão das diferentes temperaturas da junta, em consequência da região externa solidificar e resfriar mais rapidamente do que a região interna do cordão ⁽⁴⁹⁾. A formação de filmes líquidos nos contornos de grão ⁽⁵⁰⁾ também é outro fator que propicia a formação de trincas intergranulares, também denominadas por trincas a quente. A presença de hidrogênio dissolvido no material, assim como a precipitação de compostos intermetálicos ou a formação de fases frágeis, também são fatores que colaboram na formação de trincas após a soldagem, também denominadas trincas a frio.

Alguns procedimentos podem ser utilizados para evitar a presença de trincas, como exemplo, o processo de amanteigamento. Este processo consiste na deposição por meio de soldagem, de uma pré-camada, ou seja, deposição de uma camada intermediária de material de maior tenacidade em relação ao metal de base. Outros métodos que podem ser utilizados são: pré e pós-aquecimento do MB e o uso de metais de adição com limite de elasticidade maior que o do metal base.

O nível de tensão residual na soldagem pode ser diminuído usando uma sequência de soldagem ideal pré-estabelecida e utilizando mão de obra especializada, a fim de obter cordões de solda livre de defeitos.

Em estudos realizados por R. Cosentino; E. Bernasconi ⁽⁵¹⁾ para a indústria farmacêutica, a suscetibilidade a trincas a quente nos aços inoxidáveis diminui se a solda tiver pouca quantidade de ferrita δ . Segundo estudo realizado por Arata ⁽⁵²⁾

na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos a ocorrência de fissuração a quente na ZF é reduzida quando da presença de até aproximadamente 5% em volume de ferrita delta na zona de fusão (ZF).

As trincas a frio, originadas pela presença de hidrogênio durante a soldagem associada a nucleação e precipitação de fases frágeis pode causar trincas durante o processo de solidificação nas juntas soldadas. Assim são necessários cuidados na concepção do projeto, na escolha do tipo ideal de junta e nas condições de soldagem.

3.9 Corrosão em aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são materiais que apresentam excelente resistência a corrosão, porem quando submetidos ao aquecimento localizado, como é o caso de soldagem, estes aços podem apresentar fragilização conforme Souza ⁽⁵³⁾ e perda da resistência a corrosão.

No estudo realizado por Silva ⁽⁵⁴⁾ sobre a sensitização causada pelo ciclo térmico de soldagem no aço AISI 444 verificou-se por meio da técnica denominada EPR-DL (Double Loop Electrochemical Potentionkinetic Reactivation) ⁽⁵⁵⁾ e análise por microscopia óptica e eletrônica, que este aço apresenta a formação de microestruturas no material suficientes para aumentar a suscetibilidade à corrosão da ZAC. Elevadas velocidades de resfriamento podem favorecer a presença de ferrita delta (δ) em alguns aços inoxidáveis. A presença de ferrita delta (δ) pode contribuir para a redução da resistência a corrosão e fragilização às temperaturas elevadas devido à formação de fase sigma. Nos aços inoxidáveis austeníticos conformados mecanicamente e solubilizados a porcentagem de ferrita delta (δ) esperada é inferior a 3%, nos inoxidáveis fundidos entre 5% e 20% e nos aços soldados em torno de 15% ⁽¹⁶⁾.

De acordo com Lippold & Kotecki ⁽⁵⁶⁾ a ferrita δ é resultado da participação de elementos “estabilizadores da ferrita”, no caso dos aços inoxidáveis soldados que são agrupados na expressão de cromo equivalente (Cr_{eq}).

Alguns estudos indicam que maior porcentagem de ferrita δ presente na junta soldada aumenta a possibilidade de formação de fase sigma diminuindo a resistência a corrosão. No caso de aços austeníticos forjados, segundo estudos de Marshall ⁽⁵⁷⁾ (citado por Douglas O. Passos e Jorge Otubo) ⁽¹⁶⁾, quando o nível

de ferrita delta é superior a 12%, a ferrita δ muda de uma distribuição descontínua para contínua, este fator pode comprometer ainda mais as propriedades da junta soldada.

O envelhecimento, segundo Kainl ⁽⁵⁸⁾, ou seja, a exposição a trabalhos prolongados de juntas soldadas, em temperaturas acima de 315° C é outra preocupação, pois existe a tendência de formação de fases intermetálicas fragilizantes, em especial a fase sigma, a partir de ferrita delta δ .

Quando um aço inoxidável fica exposto na faixa de temperatura entre 600°C e 900°C, como é o caso de algumas regiões da soldagem, pode ocorrer a precipitação de carbonetos nos contornos de grão, ocasionando uma região sensitizada ⁽³⁴⁾ e conseqüentemente pode ocorrer a corrosão intergranular.

A corrosão intergranular é caracterizada pela degradação preferencial das regiões dos contornos de grão de uma liga metálica, causando a perda da força de coesão entre si e a redução de resistência mecânica do material ⁽⁵⁹⁾

A sensitização é um fenômeno é muito observado na ZAC dos aços inoxidáveis da serie 300 e algumas formas de diminuir este fenômeno são: usar um aço inoxidável com baixo teor de carbono (L = low carbon), empregar aços estabilizados como AISI 321 (estabilizado com titânio); AISI 347 (estabilizado com nióbio) e AISI 348 com nióbio e tântalo, resfriando rapidamente no intervalo de 1000 à 500° C. Na figura 13 é mostrada uma representação esquemática da sensitização ocorrendo na ZAC de um cordão de solda. A corrosão intergranular é um processo de corrosão seletiva no contorno de grão, sendo comum nos processos de soldagem e de tratamento térmico. Os contornos de grãos são fronteiras que separam redes cristalinas de diferentes orientações, sendo uma região com elevada quantidade de defeitos microscópicos (lacunas, átomos em posição intersticial e discordâncias). O tempo de exposição nesta faixa de temperatura de precipitação do MB influenciam na corrosão intergranular.

Figura 13: Representação esquemática da sensitização na ZAC de uma região de soldagem ⁽⁵⁹⁾.

Na figura 14 é mostrado o comportamento de uma liga de aço inoxidável e a susceptibilidade à corrosão intergranular em relação ao tempo de exposição do material às temperaturas até 750°C.

Figura 14: Aço austenítico contendo 16%Cr-0,03%C- Fonte: W.E. Mayo ⁽⁶⁰⁾

Estudos realizados por Cunto ⁽⁶¹⁾ indicam que ligeiras reduções no teor de níquel nos aços inoxidáveis diminuem a estabilidade da austenita, propiciando a formação de fase martensítica induzida por deformação a frio. Nesta situação os aços AISI 301 ficam com excelentes propriedades para aplicações estruturais com grande utilização na fabricação de composições ferroviárias.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O material de base (MB) utilizado neste estudo foi o aço inoxidável austenítico AISI 301 L na condição 1/4 duro. O material de base (MB) foi fornecido pela empresa Alstom Transportes Ltda na forma de chapas de geometria retangular com espessura de 3,2 mm. O eletrodo (material de adição – MA) empregado na soldagem MIG foi o AISI ER308 L.

Na tabela 4 estão apresentadas as composições químicas nominais do MB e do MA (conforme especificação da norma) e as composições químicas obtidas em certificado do MA e do MB obtidas por fluorescência de raios X.

Tabela 4: Composição química do MB e do MA (% em peso).

Composição Classificação	C	Mn	Si	Ni	Cr	Fe
AISI 301-L (Nominal)	<0,03	<2,00	<1,00	6,00-8,00	16,00-18,00	Bal.
AISI 301-L ¼ duro (certificado)	0,02	1,68	0,48	6,58	17,47	Bal.
AISI 308 L (Nominal)	<0,03	<2,00	<1,00	10,00-12,00	19,00-21,00	Bal.
AISI 308 L (certificado)	0,03	1,82	0,51	10,05	21,00	Bal.

4.2 Procedimento experimental

4.2.1 Preparação da junta

As chapas foram cortadas por meio de feixe laser de CO₂ nas dimensões de (3,2 x 150,0 x 350,0) mm, respectivamente, (espessura x largura x comprimento). As superfícies de corte foram preparadas visando à eliminação de rebarbas para a realização da soldagem. Utilizou-se uma junta de topo sem folga entre as chapas. Antes da execução da soldagem procedeu-se a limpeza da superfície usando-se acetona.

4.2.2 Execução da soldagem MIG

As soldagens MIG foram executadas num equipamento de soldagem MIG/MAG modelo CV 400-1 (Lincoln), alocado na empresa Alstom Ltda, conforme observado na figura 15. O procedimento de soldagem executado e o soldador estavam previamente qualificados, visando a padronização de execução da soldagem MIG do aço AISI 301 L.

Figura 15: Equipamento de soldagem a arco elétrico (MIG/MAG e TIG). Fonte: Autor

As chapas cortadas, anteriormente, foram ponteadas nas extremidades duas a duas formando um retângulo de lados nas dimensões de 350 mm X 300 mm. Nesta junta foi realizada a soldagem MIG na posição plana (1G) ⁽⁶²⁾.

Os parâmetros principais usados na soldagem MIG estão resumidos na figura 16 e fazem parte da Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS).

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM - EPS			
Processo	ER ()	TIG (GTAW) ()	MIG (GMAW) (X)
Tipo	Manual ()	Automático ()	Semi-automático (X)
Máquina	Fabrican: <i>Lincoln</i>	Tipo: <i>CV 400-1</i>	Modelo: <i>Invertec</i>
Tipo de Junta	Topo (X)	Junta em "T" ()	Outro: ()
Cobre Junta	Sim() Não(X)	Material:NA	
Metal Base: <i>AISI 301-L</i>		Espessura: 3,2 mm	
Pré-aquecimento: Sim() Não(X)		Pós Aquecimento: Sim() Não(X)	
Tensão: 17-21V	Corrente: 150-184 A	Polaridade: Inversa(X) Direta() Alternada()	
Metal de adição: <i>ER 308 L</i> – Diâmetro = 0,8 mm			Velocidade.: 355-591 mm/min
Gás de Proteção: <i>Argônio</i> – 100%			Vazão: 10-15 l/min

* N.A.: Não Aplicável

Figura 16: Parâmetros principais utilizados na soldagem com o processo MIG.

Foram soldados 6 conjuntos (lotes) nas condições indicadas na figura 16, nas dimensões finais, anteriormente mencionadas de 300 x 350 mm, conforme mostrado na figura 17.

Figura 17: Cordão de soldagem obtido na soldagem MIG. Fonte: Autor

4.2.3 Execução do reparo TIG da face do cordão

O reparo neste estudo, também denominado por retrabalho ou refusão foi realizado com o processo TIG; numa primeira etapa, apenas na face do cordão, usando o equipamento Invertec V-160-T- Lincoln sem a utilização de material de adição. O equipamento utilizado (do tipo conjugado) permitiu a soldagem MIG e o reparo por processo TIG, escolhendo-se o processo de soldagem empregado por posicionamento de um seletor no painel do gabinete da fonte. As amostras dentro de cada lote foram reparadas nas mesmas condições de soldagem. As condições empregadas no reparo pelo processo TIG estão mostradas na figura 18.

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM EPS			
Processo	ER ()	TIG (GTAW) (X)	MIG (GMAW) ()
Tipo	Manual (X)	Automático ()	Semi-automático ()
Máquina	Fabricante: <i>Lincoln</i>	Tipo: <i>CV 400-1</i>	Modelo: <i>Invertec</i>
Tipo de Junta	Topo (X)	Junta em "T" ()	Outro: ()
Metal Base: <i>AlSi 301-L</i>		Espessura: 3,2 mm	
Pré-aquecimento: Sim () Não (X)		Pós Aquecimento: Sim () Não (X)	
Tensão: <u>18-20 V</u>	Corrente: 100-200A	Polaridade: Inversa() Direta(X)	Alter.()
Gás de Proteção: <i>Argônio</i>		Mistura: Ar 100%	Vazão: 12-15 l/min
OBS: Eletrodo de tungstênio não consumível - 2% de ThO ₂ (EWTh-2) ϕ . 2,4 mm			

Figura 18: Especificação do Processo de reparo usando a soldagem TIG.

Os seis lotes soldados pelo processo MIG similares a figura 17 foram identificados como juntas 1 a 6. Os lotes 1, 5 e 6 foram armazenados para posterior caracterização mecânica e microestrutural. Os outros lotes, respectivamente, as juntas 2, 3 e 4 foram submetidos ao reparo pelo processo TIG. O reparo por TIG consistiu em refundir a face do cordão de soldagem, sem adição de MA e sem a fusão do MB.

As amostras soldadas pelo processo MIG e submetidas ao reparo da face com o processo TIG foram fabricadas conforme sequência descrita a seguir:

Junta 2 – juntas soldadas pelo processo MIG e submetidas a um reparo pelo processo TIG (1 refusão do cordão sem refundir o material de base).

Junta 3 – juntas soldadas pelo processo MIG e submetidas a dois reparos sucessivos pelo processo TIG (2 refusões do cordão sem refundir o MB).

Junta 4 – juntas soldadas pelo processo MIG e submetidas a três reparos sucessivos pelo processo TIG (3 refusões do cordão sem refundir o MB).

Na figura 19 são mostradas imagens da junta 1 (figura 19a), apenas com soldagem MIG e das juntas submetidas ao processo de reparo, respectivamente amostras das juntas 2 (figura 19b), junta 3 (figura 19c) e junta 4 (figura 19d).

Inicialmente, a proposta deste estudo era realizar o reparo apenas na face do cordão; no entanto, a execução do reparo por soldagem da raiz do cordão também foi efetuado, com a finalidade de estudar a influência do reparo na raiz do cordão e comparar com as outras condições, em especial sem reparo e com reparo da face do cordão. O reparo da raiz foi executado em condições de soldagem similares às usadas no reparo da face.

4.2.4 Ensaios não destrutivos das juntas soldadas

As juntas obtidas, após a etapa de soldagem MIG e dos reparos por TIG foram submetidas aos ensaios não destrutivos de inspeção visual e líquidos penetrantes, conforme requisitos contidos na norma D 1.1 da AWS (American Welding Society) ⁽²⁸⁾.

(a) junta 1 (sem reparo)

(b) junta 2 (1 reparo com TIG)

(c) junta 3 (2 reparos com TIG)

(d) junta 4 (3 reparos com TIG)

Figura 19: Juntas soldadas; (a) 1 a 6; (b) 7 a 12; (c) 13 a 18 e (d) 19 a 24.
Fonte: Autor

Na figura 20a observa-se a limpeza do cordão de solda, sendo realizado por meio de uma escova de aço para remoção de resíduos oriundos do processo de soldagem e não camuflar possíveis discontinuidades posicionadas na superfície do cordão de soldagem, durante a realização dos ensaios não destrutivos, em especial o ensaio de inspeção visual, realizado conforme mostrado na figura 20b.

(a)

(b)

Figura 20: (a) imagem da realização da limpeza da junta soldada por meio da utilização de escova de aço e (b) realização de ensaio de inspeção visual com auxílio de iluminação artificial (lanterna).

Fonte: Autor

Após a inspeção visual nas juntas soldadas e submetidas ao reparo realizou-se o ensaio não destrutivo por líquidos penetrantes, conforme recomendação estabelecida na norma ASME (American Society of Mechanical Engineers) - Seção V do Artigo 6, visando a detecção de descontinuidades superficiais na junta soldada. A especificação estabelecida para este ensaio está descrita na norma ASME Seção VIII, Divisão 1, Apêndice 8, que tem os principais critérios de aprovação mencionados e descritos no item 3.6.1.3 deste estudo. Nas figuras 21 e 22 são observadas todas as etapas da realização do ensaio por líquidos penetrantes, respectivamente da face e da raiz do cordão.

4.2.5 Corte e preparação das amostras

Após a realização dos ensaios não destrutivos, as juntas foram cortadas por meio de um feixe laser de CO₂, alocado na empresa Alstom Transportes Ltda, na geometria de amostras planas para ensaios de tração e fadiga, de acordo com as dimensões especificadas nas normas ASTM E 8M 90⁽³²⁾ para ensaio de tração e ASTM E466⁽³³⁾ para ensaio de fadiga. A geometria e dimensões da amostra empregada para ensaio de tração e fadiga estão indicadas na figura 23a.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 21: Ensaio de L.P. na face do cordão-(a) aplicação do líquido penetrante, (b) remoção do líquido penetrante, (c) aplicação do líquido revelador e (d) secagem do líquido revelador.

(a)

(b)

Figura 22: Ensaio L.P. da raiz do cordão (a) aplicação do líquido penetrante e (b) aplicação do revelador.

Fonte: Autor

L = comprimento total = 200 mm
 B = comprimento da região de aperto da garra = 50 mm
 A = comprimento da seção reduzida = 57 mm (min.)
 G = comprimento da área reduzida = 50 mm
 C = largura da região de aperto da garra = 20 mm
 R = raio de concordância = 12,5 mm
 W = largura da área reduzida =
 T = espessura = 3,2 mm

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 23: (a) geometria e dimensões das amostras a serem cortadas com feixe laser com base na norma ASTM E 8M 90 e (b), (c), (d) e (e) imagens das juntas cortadas com feixe laser, respectivamente, da junta 1, junta 2, junta 3 e junta 4.

Fonte: Autor

Foram obtidas 6 amostras para cada junta ou lote. As amostras foram numeradas obedecendo a sequência numérica de: amostras 1 a 6 para junta 1, amostras 7 a 12 para junta 2, amostras 13 a 18 da junta 3, amostras 19 a 24 para junta 4, amostras 25 a 30 para junta 5 e amostras 31 a 36 para junta 6.

Nas figuras 23b a 23e são observadas as juntas 1 a 4, após a realização da operação de corte com laser, restando ainda destacar da chapa inicial de trabalho, obtendo amostras de geometria plana para realizar ensaios de tração e de fadiga visando à avaliação das propriedades mecânicas da junta soldada e das juntas submetidas ao processo de reparo.

As rebarbas residuais provenientes da operação de corte a laser foram eliminadas em todo o perímetro das amostras com uma microrretífica com ponta rotativa. Com a finalidade de assegurar o rastreamento as amostras receberam uma identificação física de acordo com a tabela 5, usando também uma microrretífica na identificação numérica. Na figura 24 podem ser observados detalhes de um cuidadoso processo de identificação visando não provocar concentradores de tensão nesta região e a geometria das amostras a serem usadas nos ensaios mecânicos de tração e fadiga.

(a)

(b)

Figura 24: (a) Marcação numérica das amostras por meio de microrretífica e (b) geometria da amostra para ensaio de tração e fadiga com indicação do cordão de solda na região central da amostra.

Fonte: Autor

4.3 Controle de qualidade da junta soldada

4.3.1 Análise dimensional

A análise dimensional dos cordões de solda foi realizada usando-se um paquímetro e um calibre de solda. As dimensões do cordão de solda, respectivamente altura (reforço) e largura do cordão foram medidas nas amostras seccionadas, conforme mostrado na figura 25. O ângulo do reforço foi medido com auxílio de um goniômetro (transferidor de graus).

(a)

(b)

Figura 25: (a) medição da altura do cordão; (b) medição da largura do cordão.
Fonte: Autor

Na tabela 5 é apresentada a identificação numérica das juntas obtidas neste estudo, em relação à cada junta soldada e ao reparo realizado, com os respectivos ensaios de controle de qualidade executados (IV e LP) na condição analisada.

Tabela 5: Mapeamento geral do número da amostra em relação à soldagem e aos reparos com aos ensaios não destrutivos IV (inspeção visual) e LP (líquido penetrante) realizados.

Junta	Amostra	Soldagem MIG			Soldagem MIG + Reparo com TIG								
		Sem Reparo	I.V.	L.P.	1° Reparo	I.V.	L.P.	2° Reparo	I.V.	L.P.	3° Reparo	I.V.	L.P.
01	01	•	•	•									
	02	•	•	•									
	03	•	•	•									
	04	•	•	•									
	05	•	•	•									
	06	•	•	•									
02	07	•	•	•	•	•	•						
	08	•	•	•	•	•	•						
	09	•	•	•	•	•	•						
	10	•	•	•	•	•	•						
	11	•	•	•	•	•	•						
	12	•	•	•	•	•	•						
03	13	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	14	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	15	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	16	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	17	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	18	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
04	19	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	20	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	21	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	22	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	23	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	24	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
05	25	•	•	•									
	26	•	•	•									
	27	•	•	•									
	28	•	•	•									
	29	•	•	•									
	30	•	•	•									
06	31	•	•	•									
	32	•	•	•									
	33	•	•	•									
	34	•	•	•									
	35	•	•	•									
	36	•	•	•									

4.3.2 Caracterização mecânica

Algumas amostras para ensaio de tração e fadiga foram usinadas, visando a retirada do reforço. O reforço foi retirado por fresagem, conforme observado na figura 26, usando baixo avanço e assim, retirando cavacos com a menor dimensão possível, para não introduzir novas tensões residuais na junta.

Figura 26: (a) Detalhe da operação de fresagem e (b) amostra de tração/fadiga com reforço de soldagem e sem reforço removido por fresamento.
Fonte: Autor

As amostras, com e sem reforço, foram submetidas aos ensaios de tração e fadiga. As amostras foram submetidas a ensaio de tração num equipamento universal Instron 4400R, alocado no Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM) do IPEN, conforme recomendações de ensaio contidas da norma ASTM, ASTM E8⁽³²⁾ usando célula de carga de 10 toneladas e velocidade de ensaio de 10 MPa por segundo. No ensaio de tração foram obtidos os valores de limite de ruptura (LR) e alongamento (A).

Os ensaios de fadiga⁽⁶³⁾ foram realizados com cargas de 150 a 1500 kgf e frequência de 20 Hz até a fratura do material e registrado o número de ciclos. Os ensaios de fadiga foram executados num equipamento Instron modelo 1334 com capacidade de 50 toneladas alocado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e no Centro Universitário da FEI num equipamento MTS mod. 810. Na figura 27 é mostrado detalhe do ensaio de fadiga e da tela gerada no teste realizado no Centro Universitário da FEI.

Figura 27: (a) máquina de ensaio de fadiga e (b) tela com dados durante o ensaio.

Os ensaios de microdureza Vickers ⁽⁶⁴⁾ foram executados no Centro Universitário da FEI num microdurômetro Shimatsu modelo HMV-2 com carga de 0,5 Kg. Foram medidos os valores de microdureza e construiu-se um perfil de microdureza Vickers da junta soldada em relação à distância da zona fundida.

4.3.3 Caracterização microestrutural

A preparação metalográfica foi realizada no IPEN em amostras representativas de cada lote. As amostras foram retiradas da seção transversal da junta soldada e posteriormente, preparada por técnicas metalográficas de lixamento e polimento em alumina. As amostras foram submetidas ao ataque eletroquímico com uma solução de 50% HNO₃ e 50% de água utilizando um equipamento BUEHLER-Electronet 4.

A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura no CCTM do IPEN. Empregou-se um microscópio óptico Olympus BX 60M, enquanto a microscopia eletrônica de varredura foi realizada usando equipamento Philips XL30 acoplado com espectrometria dispersiva de raios X (EDS).

O teor de ferrita δ foi medido usando ferritoscópio Fischer MP 30 pertencente ao Centro de Laboratórios Mecânicos (CLM) do Centro Universitário da FEI. A quantidade desta fase foi medida na ZF em todas as amostras. Realizaram-se 5 medidas em cada amostra e determinou-se o valor médio com o respectivo desvio padrão.

4.3.4. Ensaio de suscetibilidade a corrosão intergranular

A avaliação da susceptibilidade à corrosão intergranular foi realizada no IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) com base na norma ASTM A 262-2a ⁽⁶⁵⁾. Nesta norma o ensaio utilizado baseia-se no ataque eletroquímico da amostra em uma solução de ácido oxálico. Observou-se por microscopia óptica a ZAC das soldas e realizou-se uma comparação com padrões contidos na norma ASTM A 262 prática A.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaios não destrutivos

5.1.1 Inspeção visual

As juntas soldadas pelo processo MIG analisadas por inspeção visual antes da execução do reparo não apresentaram indicações na superfície do cordão, que ocasionassem reprovação da junta segundo norma AWS D1.1 ⁽²⁸⁾.

Após a execução dos reparos pelo processo TIG, na face ou na raiz, todas as juntas foram novamente avaliadas por inspeção visual visando verificar a presença de possíveis descontinuidades na superfície.

Descontinuidades superficiais tais como mordeduras, porosidades, trincas e sobreposições com dimensão acima dos limites impostos pela norma AWS D1.1 (item 3.6.1.1) não foram observadas, tanto na face como na raiz do cordão. Os resultados obtidos no ensaio de inspeção visual indicaram a aprovação de todas as soldas e dos reparos realizados, segundo critérios de aceitação desta norma. Na figura 28 é mostrado um relatório de inspeção visual típico gerado neste ensaio.

Relatório N° <u>001</u>				RELATÓRIO DE INSPEÇÃO VISUAL		Folha <u>1/1</u>
Cliente: <i>Pesquisa Laboratorial</i>				Local:		
Material: <i>Aço inox AISI 301-L</i>				Especificação:		
Tipo de Junta: <i>Topo</i>				Acabamento: <i>Escovado</i>		
Condição: <i>Inspeção após soldagem com processo MIG</i>				Iluminação: <i>Artificial/ lanterna</i>		
Peça Junta	Descontinuidade	Dimensão	Local	Laudo		Obs
				Insp.	Reinspeção	
01	Não	-----	-----	A	A	-----
02	Não	-----	-----	A	A	-----
03	Não	-----	-----	A	A	-----
04	Não	-----	-----	A	A	-----
05	Não	-----	-----	A	A	-----
06	Não	-----	-----	A	A	-----
Notas/observações: <i>Inspeção após soldagem com processo MIG nas 6 juntas</i>						
Legenda: A- Aprovado R: Reprovado N.A.: Não Aplicável						

Figura 28: Relatório gerado a partir de inspeção visual (IV) das juntas soldadas e com a realização de reparo.

5.1.2 Ensaio por Líquidos Penetrantes

O ensaio por líquidos penetrantes foi realizado após o ensaio de inspeção visual das juntas. Os resultados obtidos estão mostrados no relatório da figura 29, no qual foi registrado que nas juntas soldadas e submetidas ao reparo não foram detectadas descontinuidades na superfície, segundo especificado na norma ASME Sec. V Art. 6 ⁽²⁵⁾ e critério de aceitação conforme ASME Sec. VIII Div.1 Ap.8 ⁽⁶⁶⁾.

Relatório N° <u>001</u>		RELATÓRIO DE INSPEÇÃO LÍQUIDOS PENETRANTES			Folha <u>01/01</u>	
Cliente: <i>Pesquisa Laboratorial</i>				Local:		
Material: <i>Aço inox AISI 301</i>				Especificação (ensaio) ASME Sec V Art. 6		
Tipo de Junta: <i>Topo</i>				Critério de Aceitação: ASME Sec.VIII Div.1 AP.8		
Desenho: <i>N.A.</i>				Tratamento Térmico: <i>NA</i>		
Penetrante/Tipo: <i>Metal Chek V.P.30</i>		Removedor: <i>Água</i>		Revelador: Metal Chek D.70		
Junta	Descontinuidade	Dimensão	Local	Insp.	Reinspeção	Obs:
01	<i>Não</i>	-----	-----	A	A	-----
02	<i>Não</i>	-----	-----	A	A	-----
03	<i>Não</i>	-----	-----	A	A	-----
04	<i>Não</i>	-----	-----	A	A	-----
05	<i>Não</i>	-----	-----	A	A	-----
06	<i>Não</i>	-----	-----	A	A	-----
Notas/observações: <i>Inspeção após soldagem com processo MIG nas 6 juntas</i>						
Legenda: A- Aprovado R: Reprovado N.A.: Não Aplicável						

Figura 29: Relatório de inspeção por líquidos penetrantes (LP) das juntas soldadas e submetidas ao reparo.

Na figura 30 pode ser verificado que as regiões da face e da raiz do cordão, após a aplicação do líquido revelador não evidenciaram indicações de descontinuidades nas superfícies, o que pode ser atribuído a seleção correta dos parâmetros de soldagem usados neste trabalho.

Figura 30: Inspeção por L.P. após a aplicação do revelador; (a) imagem na face submetida ao reparo TIG e (b) imagem da na raiz sem a realização de reparo.
Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados I.V. e L.P. e exibidos nas figura 28, figura 29 e figura 30 verifica-se que não foram detectadas descontinuidades na superfície na região do cordão de solda, tanto na face como na raiz da solda. As condições usadas na soldagem e nos reparos realizados propiciaram a aprovação das juntas pelo ensaio visual e por líquidos penetrantes.

Após a realização da soldagem e dos reparos, os relatórios de inspeção visual e líquidos penetrantes foram emitidos com objetivo de padronizar a junta soldada em cada etapa do processo experimental. No cotidiano das empresas as EPSs devem ser usadas como roteiro, para que os soldadores utilizem os parâmetros pré-definidos a serem empregados na realização da soldagem. A própria qualificação dos soldadores está contida numa listagem anexa EPS. Este conjunto de dados do processo e do soldador propicia a padronização da soldagem.

5.1.3 Análise dimensional

Nas juntas soldadas e submetidas ao reparo em todas as condições foi realizada a análise dimensional do cordão. Mediram-se as dimensões do ângulo de reforço, largura e altura do cordão. Na tabela 6 estão apresentados os valores obtidos da largura do cordão para cinco posições aleatórias ao longo do comprimento da solda e na tabela 7 estão indicados os valores da altura (reforço) e do ângulo do reforço ao longo do cordão.

Tabela 6: Dimensão da largura dos cordões [mm] e médias com desvio padrão.

Junta	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Média c/ desvio padrão
01	9,30	9,40	9,60	9,50	9,40	9,40 ± 0,10
02	10,30	11,00	10,50	10,40	10,50	10,50 ± 0,20
03	12,00	11,90	12,90	12,30	12,30	12,30 ± 0,30
04	12,40	12,80	12,40	12,60	12,50	12,50 ± 0,10
05	9,00	9,50	9,00	9,20	9,20	9,20 ± 0,20
06	9,10	9,30	9,50	9,50	9,10	9,30 ± 0,20

Obs: Juntas 1, 5 e 6 têm a mesma condição de soldagem.

Tabela 7: Dimensão da altura dos cordões (reforço) em [mm] e ângulo de reforço (θ) em graus.

Junta	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5	Média c/desvio padrão	θ°
01	1,70	1,90	1,80	1,90	2,00	1,80 ± 0,10	150 ± 5
02	1,80	1,70	1,60	1,70	1,60	1,70 ± 0,10	148 ± 4
03	1,60	1,50	1,70	1,50	1,50	1,60 ± 0,10	152 ± 4
04	1,50	1,40	1,40	1,30	1,40	1,40 ± 0,10	160 ± 3
05	2,00	2,10	2,00	2,00	1,90	2,00 ± 0,10	153 ± 2
06	1,80	2,00	1,90	1,90	1,90	1,90 ± 0,10	152 ± 3

A partir dos resultados obtidos pelas seguidas refusões dos cordões de soldas verifica-se uma mudança no perfil das soldas, em consequência do calor adicional imposto (aporte de calor) introduzido pelo reparo. Os reparos (refusões) da região do reforço e da raiz provocaram fusão deste material, assim a altura do cordão sofre uma diminuição, em consequência do espalhamento do material na superfície do MB. De maneira análoga ocorreu um aumento da largura do cordão. Observou-se um aumento do ângulo de reforço nas amostras com 3 reparos (junta 4) em relação à condição sem reparo. No caso do reparo da raiz ocorreu uma tênue acomodação do metal líquido sobre o MB.

No processo de refusão não acontece adição de material, consequentemente, os volumes de metal da face e da raiz cordão não foram alterados, havendo apenas uma acomodação do metal líquido da ZF sobre a superfície do material de base, conforme observado nos resultados mostrados na tabela 6 e tabela 7.

5.2 Ensaios Destrutivos

5.2.1 Ensaio de tração

Na figura 31 é apresentado um gráfico típico de carga x deslocamento obtido no ensaio de tração. A partir das dimensões medidas da amostra (largura e espessura) e dados alimentados no próprio programa foram calculadas as propriedades, tensão de ruptura e alongamento. Os valores obtidos para a amostra 6 foram de 95,96 Kgf/mm² (959,6 MPa) para limite de resistência e deslocamento de 32,00 mm, que dividido pelo comprimento inicial representa a % de alongamento. Neste gráfico é mostrada a carga (ordenadas) em (kgf) e a deslocamento (abscissas) em (mm).

Figura 31: Curva representativa da carga aplicada X deslocamento no teste de tração da amostra 6 (junta 1).

Na tabela 8 são mostrados os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios de tração, em relação à condição da junta (soldagem MIG, quantidade de reparo TIG) e da amostra com ou sem presença de reforço, além da indicação do local de ruptura no ensaio. Observa-se que os valores obtidos no ensaio de tração das amostras com reforço indicaram tensão de ruptura e alongamento superiores ao MB (tensão de ruptura de 825 MPa e alongamento mínimo de 25%, conforme mostrado tabela 2). No entanto, para as amostras sem o reforço do cordão, o valor alcançado pela tensão ruptura do MB não foram suficientes para a aprovação das juntas nestas condições. Na AWS D1.1. item 4.8.3.5 desta norma

é recomendado que as propriedades mecânicas da junta devem ser no mínimo similares às encontradas no MB.

Tabela 8: Resultados obtidos no ensaio de tração em relação à condição da junta e da amostra com reforço (c/ reforço) e sem reforço (s/ reforço), bem como local de ruptura e resistência mecânica.

Junta	Condição da junta	Condição da amostra	Local de Ruptura	Tensão de Ruptura [MPa]	Alongamento (%)
PROPRIEDADES DO MB AISI 301				825	25
01	Soldagem MIG	C/ reforço	M.B.	929 ± 26	31 ± 2
02	Soldagem MIG + 01 reparo TIG	S/ reforço	Z.F.	683 ± 25	13 ± 1
		C/ reforço	M.B.	924 ± 30	30 ± 1
03	Soldagem MIG + 02 reparos TIG	S/ reforço	Z.F.	677 ± 29	11 ± 1
		C/ reforço	M.B.	854 ± 28	32 ± 1
04	Soldagem MIG + 03 reparos TIG	S/ reforço	Z.F.	665 ± 32	12 ± 1
		C/ reforço	M.B.	857 ± 10	32 ± 2
05	Soldagem MIG	S/ reforço	Z.F.	729 ± 9	16 ± 1
06	Soldagem MIG	S/ reforço	Z.F.	740 ± 19	14 ± 1
		C/ reforço	M.B.	916 ± 21	32 ± 1

Na figura 32 e figura 33 são mostrados os gráficos comparativos das tensões de ruptura e de alongamento, em relação às juntas apenas soldadas e com reparos (refusões). Verifica-se que a presença do reforço do cordão alterou as propriedades mecânicas da junta. Os valores do limite de ruptura e alongamento das amostras com reforço foram maiores em relação às amostras sem o reforço.

Observa-se uma tendência da redução do limite de resistência da junta, quando da realização dos reparos (refusões), se comparado com os resultados das juntas apenas soldadas com processo MIG (sem reparo).

Na figura 33a é mostrado que o alongamento nas amostras com reforço foi superior ao especificado nas amostras sem reforço (vide Figura 32b). O alongamento superior ao mínimo de 25% é a condição aceita nesta aplicação. Nas amostras sem reforço a ruptura ocorreu com valores abaixo do alongamento mínimo e não propiciando sua aprovação.

Figura 32: Ruptura das amostras (a) com reforço e (b) sem reforço em relação a quantidade de reparos (refusões).

Figura 33: Alongamento das amostras (a) com reforço e (b) sem reforço em relação a quantidade de reparos (refusões).

Na figura 34 são mostradas as amostras com reforço rompidas fora da região da solda, portanto no metal de base. Observa-se uma nítida estricção na região do MB, onde ocorreu a fratura.

(a) Junta 1

(b) Junta 4

Figura 34: Amostras com reforço (a) e (b) com fratura no MB, longe da região de soldagem.

Fonte: Autor

As amostras sem reforço sofreram fratura em sua maioria na região da interface entre a ZF e a ZAC. Conforme mostrado na figura 35 não se observa a presença de estrição significativa na região da fratura.

(a) Junta 5

(b) Junta 5

Figura 35: Amostras sem reforço (a) e (b) com fratura na ZF ou na interface ZF e ZAC (junta 5).

Fonte: Autor

As amostras sem reforço não estão aprovadas segundo a norma AWS D1.1 (item 4.8.3.5), a qual recomenda como local de ruptura o metal de base. Após avaliação do local da ruptura nas amostras com reforço foi possível constatar que, as rupturas ocorreram no metal de base, enquanto as amostras sem reforço romperam na interface ZF/ZL.

Nas amostras com reforço testadas foi constatado que as médias dos limites ruptura e alongamento estão acima do requerido pela especificação do MB, vide tabela 8. No entanto, para soldas sem reforço os valores estão abaixo do especificado.

Na sequência deste trabalho realizou-se a análise por microscopia, apresentada no item 5.3.4 para as juntas soldadas com e sem reforço. Além da caracterização microestrutural foram estudadas possíveis descontinuidades não detectadas na inspeção visual e líquidos penetrantes que poderiam ter provocado a redução das propriedades mecânicas. Portanto uma análise mais detalhada foi executada nas juntas sem reforço, para verificar as causas da diminuição da tensão de ruptura e do alongamento.

5.3.2 Ensaio de microdureza Vickers

Na figura 36 é mostrada a variação da microdureza Vickers (HV) nas diversas regiões da junta soldada. Observou-se uma redução da dureza na região do metal de solda (MS) ou zona de fusão (ZF) em relação ao MB. Numa amostra da junta 1 o valor médio na MS ou ZF foi de (272 ± 12) HV, enquanto para juntas com reparo o valor médio foi de (260 ± 12) HV. O calor adicional no cordão (aporte de calor), em razão do reparo pode ter ocasionado uma leve redução nos valores médios de dureza e em alguns locais foram inferiores ao valor de mínimo de 266 HV como indicado pela norma ASTM A 666⁽¹⁰⁾ para o AISI 301 ¼ duro.

O valor médio de microdureza Vickers obtido na ZAC foi de (269 ± 9) HV e no MB de (323 ± 4) HV. Observa-se uma redução da dureza no MB a medida que se aproxima da zona de fusão. Os perfis de microdureza Vickers x distância na junta são similares entre si e não se observaram diferenças significativas longo das juntas apenas soldadas e submetidas ao reparo, conforme observado na figura 36.

As pequenas dispersões observadas nos valores médios de microdureza Vickers podem ser atribuídas às alterações locais na microestrutura nas diversas regiões soldadas.

Figura 36: Perfil de microdureza Vickers em relação à distância (mícrons) nas diversas juntas e regiões soldadas.

5.3.3. Ensaio de fadiga

Na tabela 9 é mostrado o número de ciclos até a falha no ensaio de fadiga e o local da ruptura. Nas duas primeiras linhas são mostrados os resultados obtidos apenas para soldagem MIG com e sem o reforço do cordão. Na sequência são apresentados os resultados obtidos para as condições de soldagem MIG + 1 reparo TIG na face (junta 2), soldagem MIG + 2 reparos TIG na face (junta 3) e soldagem MIG + 3 reparos na face (junta 4).

Ainda na tabela 9 são mostrados os resultados alcançados nas amostras com o reparo também na raiz. O reparo da raiz foi realizado em razão do pequeno número de ciclos até a fratura, alcançado no ensaio de fadiga, e após ter sido observada a presença de descontinuidades na raiz do cordão. Esta descontinuidade na raiz do cordão não foi observada após a realização dos ensaios não destrutivos de IV e LP e sua presença foi constatada apenas, após a realização de ensaios de tração e ensaios iniciais de fadiga.

Assim os resultados obtidos nas amostras 1, 5 e 6 foram separados na tabela 9 nas condições, apenas com soldagem MIG e em amostras com soldagem MIG e reparo da raiz. Constituindo uma nova condição de junta e identificada com (*) na tabela 9. Os resultados foram separados em razão da elevada diferença do número de ciclos obtidos no ensaio.

Em algumas amostras da junta 4 (soldagem MIG + 3 reparos da face) também foi realizado o reparo da raiz do cordão. O reparo na raiz não estava

previsto na etapa inicial deste estudo e foram realizados em razão do aparecimento de descontinuidade na raiz. Estas amostras aparecem identificadas com (**) na tabela 9.

Tabela 9: Resultados dos valores médios alcançados no ensaio de fadiga em relação à condição da junta e da amostra.

Condição da junta	Condição da amostra	Local de Ruptura	Número de ciclos até a falha
Soldagem MIG (sem reparo) – juntas 1 e 5	c/ reforço	Interface ZL/ZAC	$1,5 \times 10^5$
Soldagem MIG (sem reparo) – juntas 1 e 5	s/ reforço	Interface ZF/ZAC	$4,0 \times 10^5$
Soldagem MIG + 01 reparo TIG (junta2)	c/ reforço	Interface ZL/ZAC	$5,0 \times 10^4$
	s/ reforço	Interface ZL/ZAC	$1,3 \times 10^5$
Soldagem MIG + 02 reparos TIG (junta 3)	c/ reforço	Interface ZF/ZAC	$5,0 \times 10^4$
	s/ reforço	Interface ZL/ZAC	$1,4 \times 10^5$
*Soldagem MIG (s/ reparo da face e com reparo da raiz) (juntas 1, 5 ou 6)	c/ reforço	Interface ZL/ZAC	$1,0 \times 10^6$
	s/ reforço	Não rompeu	$>1,2 \times 10^7$
**Soldagem MIG + 03 reparos TIG da face e reparo da raiz (junta 4)	c/ reforço	Interface ZF/ZAC	$1,0 \times 10^6$
	s/ reforço	Não rompeu	$>1,2 \times 10^7$

* Amostras submetidas apenas ao reparo da raiz

** Amostras submetidas aos reparos da face e da raiz

Observa-se que, o reforço do cordão influenciou a quantidade de ciclos suportada pela junta antes da ruptura. Os resultados apresentados na tabela 9 indicaram que amostras sem reforço (s/reforço) suportaram maior quantidade de ciclos antes da ruptura, se comparados com as amostras com reforço (c/ reforço) na mesma condição da junta.

A menor altura do reforço na junta obtida a partir dos reparos sucessivos com TIG também favoreceu uma maior quantidade de ciclos antes da ruptura. O aumento do número de reparos realizados nas juntas com reforço possibilitou a elevação do número de ciclos antes de ruptura. Tendência similar foi observada em juntas sem reforço, onde a quantidade de ciclos antes da ruptura aumentou para as condições com um reparo (junta 2) e 2 reparos (junta 3). No entanto,

verificou-se em todas as amostras sem reparo da raiz e submetidas ao ensaio de fadiga, que a ruptura ocorreu para um número pequeno de ciclos.

A partir deste resultado confirmou-se a presença da descontinuidade falta de fusão na raiz, conforme observado na figura 45, assim houve necessidade de executar um reparo na interface da raiz e o MB. O reparo realizado na raiz do cordão, também usando o processo TIG, auxiliou na eliminação desta descontinuidade, possibilitando obter resultados no ensaio de fadiga bem superiores, se comparado aos resultados obtidos nas amostras sem o reparo da raiz, vide tabela 9.

Nas amostras submetidas ao reparo da raiz, com a remoção do reforço da face e da raiz, não ocorreu rompimento da amostra, mesmo com uma quantidade de ciclos superior a $1,2 \times 10^7$ ciclos. As amostras com reforço e com reparo na face e na raiz sofreram ruptura na interface da ZF/ZAC, com número de ciclos em torno de $1,0 \times 10^6$ antes do rompimento; este número de ciclos foi muito superior às amostras submetidas apenas ao reparo da face. Portanto, a realização do reparo da raiz se mostrou benéfico em elevar o número de ciclos antes da ruptura.

A retirada do reforço por usinagem, ou ainda, a redução da altura deste reforço pela realização do reparo atenuou o efeito de concentração de tensão e aumentou a resistência à fadiga da junta soldada. Estes resultados estão concordantes com a literatura ^{(40) (41) (42) (34) (35) (67)}, na qual é mostrada a influência da altura e da presença do reforço do cordão de solda exercem na resistência a fadiga. A retirada do reforço por usinagem ou a redução da altura deste reforço pela realização do reparo atenuou o efeito de concentração de tensões, em especial na margem do cordão da solda e aumentou a resistência a fadiga da junta soldada.

5.3.4 Caracterização microestrutural

Na figura 37 são observadas as seções transversais dos cordões obtidos nas diversas condições de soldagem usadas neste trabalho. Verifica-se que a penetração de soldagem é total, sendo homogênea em todas as condições da junta. Nas seções analisadas pode ser observada que as juntas apresentaram penetração excessiva e a olho nu não foi observada a presença de outras descontinuidades. A penetração acima da espessura do MB pode ser atribuída a

elevada intensidade de corrente ou a baixa velocidade de soldagem usada na soldagem.

(a) MIG

(b) MIG + 1 reparo TIG

(c) MIG + 2 reparos TIG

(d) MIG + 3 reparos TIG

Figura 37: Macrografias da seção transversal - (a) junta 1 sem reparo; (b) junta 2 com 1 reparo; (c) junta 3 com 2 reparos e (d) junta 4 com 3 reparos.

Na figura 37a observa-se um perfil típico da junta 1, apenas com soldagem MIG. À medida que são executadas as refusões, a altura do cordão (reforço) diminui e a largura aumenta como mostrado na figura 37b, figura 37c e figura 37d. Estas observações corroboram com os resultados obtidos na análise dimensional do cordão de solda apresentada na tabela 6 e tabela 7.

A diluição das juntas foi calculada a partir da equação 3 e o valor obtido situou-se em $(22 \pm 1) \%$. O valor da diluição não sofreu alteração significativa, em relação às condições usadas na junta, isto é, sem e com reparo, uma vez que, o reparo foi realizado sem MA e as áreas do cordão de solda e de participação do MB na junta não tiveram alterações significativas, apenas acomodação do metal fundido na superfície do MB.

Na figura 38 são mostradas imagens obtidas por microscopia óptica do material de base. Observa-se uma microestrutura composta basicamente por grãos austeníticos com tamanho de $(15,2 \pm 4,4) \mu\text{m}$ (Grão ASTM 8.8), medidos conforme ASTM E112 ⁽⁶⁸⁾. Os grãos possuem uma orientação cristalográfica causada pela conformação mecânica realizada durante as etapas de fabricação no material.

Figura 38: (a) e (b) Imagens obtidas por microscopia óptica do MB com destaque para o contorno de grão austenítico – (a) ataque eletroquímico com ácido oxálico, (b) ataque eletroquímico com ácido nítrico.

Observa-se na figura 39 que há presença de linhas na direção de laminação do MB, as análises realizadas por EDS destas linhas indicaram maior presença de cromo em relação à matriz. Medidas efetuadas por ferritoscópio no MB apresentaram valores de $(2,0 \pm 0,5)$ % de ferrita δ . Kotecki and Lippold⁽⁵⁶⁾ verificaram linhas similares na microestrutura, o que foi atribuída a segregação de cromo ocorrida na solidificação e também em razão do processamento termomecânico durante as etapas de fabricação do aço AISI 301.

Portanto, o valor da ferrita residual medida por ferritoscópio no MB pode ser resultado da segregação de cromo que estabiliza a ferrita δ no processo de fabricação. Os sucessivos ciclos de tratamentos térmicos decorrentes durante a etapa de fabricação não foram suficientes para eliminar a fase ferrítica no MB, sendo estes locais são preferenciais para a ocorrência da precipitação de carbonetos de M_6C e nucleação de fase sigma que pode fragilizar o material de base.

Na figura 39 são mostradas imagens obtidas por microscopia óptica (MO) e por microscopia eletrônica de varredura da junta reparada na face do cordão e na região da interface formada entre o MB e MA.

Figura 39: MB com indicação de linhas de ferrita ao longo da conformação. Imagens obtidas por (a) microscopia óptica e (b) microscopia eletrônica de varredura.

Na figura 39a (junta 1) verifica-se que a zona de fusão é composta por uma microestrutura muito fina, em consequência da elevada velocidade de resfriamento e a morfologia é basicamente dendrítica, favorecida pela relação do gradiente de temperatura (G) e a velocidade de avanço da interface (R).

O valor da relação Cr_{eq}/Ni_{eq} calculada pelas equações 1 e 2 está próximo de 2,0 para o aço AISI 301 L, portanto, o início solidificação da ZF ocorre como ferrita δ . Na sequência da solidificação forma-se no líquido remanescente, uma fase austenítica, via reação peritética-eutética, no contorno da célula ou da dendrita de ferrita provocando o final da solidificação.

No caso de taxas de resfriamento moderadas, como neste caso de soldagem com o processo MIG/MAG e reparo por TIG, levando ainda em consideração a relação de Cr_{eq}/Ni_{eq} próxima de 2,0 resultou numa morfologia do tipo vermicular, que é consequência do avanço da austenita consumindo a ferrita, até a ocorrência do enriquecimento de elementos ferritizantes provocando a estabilização da fase ferrítica no centro das dendritas de acordo com a diminuição das temperaturas. Portanto, a partir desta sequência de solidificação origina-se

uma morfologia de ferrita resultante da FA (ferrita-austenita) com o aparecimento de ferrita δ residual na ZF ou MS ^{(56) (69) (52)}.

Nas amostras sem e com reparo, vide figura 40 observa-se que a microestrutura e a morfologia das fases não alteraram de forma significativa a microestrutura das regiões fora do reparo. Observam-se nas figuras 40b, 40c e 40d as marcações oriundas dos reparos na microestrutura da ZF (MS).

Figura 40: Imagem obtida por microscopia óptica da interface (ZF), (ZL) e (ZAC). (a) junta 1, (b) junta 2; (c) junta 3; (d) junta 4.

Na figura 41 são observadas imagens da ZF ou MS (metal de solda) obtidas por MEV com a utilização de espectrometria dispersiva de raios X (EDS). Foram realizadas medidas na matriz conforme indicado na figura 41a e na fase residual de vermicular, vide indicação da figura 41b.

Medidas realizadas por EDS na matriz (área clara) vide figura 41a, indicaram porcentagens de níquel, aproximadamente, 10 % superior à área escura (figura 41b). O teor de cromo foi, aproximadamente, 10 % superior na área escura em relação à área clara. Observa-se que na matriz (região clara) ocorre uma maior presença de níquel e menor presença de cromo propiciando a estabilização da fase austenítica. Na região vermicular (área escura) existe maior teor de cromo e menor porcentagem de níquel, o que possibilita a estabilização da ferrita δ , conforme mencionado anteriormente.

Figura 41: Imagem obtida por MEV com difratograma de elementos do MS obtido por EDS com pontos de medição da matriz (a) e região vermicular (b).

Alguns trabalhos ⁽⁵²⁾ ⁽⁵⁶⁾ ⁽⁷⁰⁾ indicados na literatura registram o efeito benéfico da ferrita δ , em teores de até 10%, em prevenir a formação de trincas a quente na soldagem em aços inoxidáveis e com isso melhorar o comportamento mecânico das juntas soldadas.

O teor de ferrita δ previsto pelo Diagrama de Schaeffler na soldagem do AISI 301 L, com MA AISI 308 L está em torno de 10 %, conforme pode ser observado na figura 6 (Diagrama de Schaeffler), usando o valor médio calculado para a diluição de (22 ± 1) % na ZF obtém-se o teor de ferrita δ . Adicionalmente, foram medidos os teores de ferrita δ da ZF medidos por ferritoscópio, e os resultados estão apresentados na tabela 10. Verifica-se uma diferença entre o valor estimado pelo diagrama e o medido pelo ferritoscópio, o que pode ser atribuído às diferentes condições de resfriamento obtidas nas diversas regiões do cordão de solda.

Tabela 10: Valores médios da porcentagem de ferrita δ na ZF.

Condição de Junta	1	2	3	4
Valor médio	8,06+0,77	5,96+0,83	5,48+1,40	5,52+1,30

Observa-se uma tendência da porcentagem da ferrita δ diminuir à medida que ocorrem os processos de refusões. Na tabela 10 verifica-se uma redução em torno de 20 % entre a soldagem MIG (condição 1) e o primeiro passe TIG, e posteriormente não ocorrem variações significativas nos resultados das refusões (reparo) com o TIG (condição 2, 3 e 4).

Na figura 42 são observadas as regiões da ZF sem reparo (junta1) e com 3 reparos (junta 4). Observa-se que a quantidade de ferrita δ na ZF diminui com a execução do reparo (ver tabela 10). O aumento do calor imposto (aporte de calor) em razão das refusões contribui para a redução da porcentagem de ferrita δ , pois o calor adicional das refusões facilita uma maior difusão do Cr e Ni, respectivamente, estabilizantes da ferrita δ e da austenita e reduz a quantidade da fase metaestável (ferrita δ) na temperatura ambiente.

(a) – junta 1

(b) – junta 4

Figura 42: Imagem obtida por MO do centro ZF com destaque para morfologia vermicular da ferrita δ . (a) junta 1; (b) junta 4.

Na figura 43 observam-se imagens obtidas por MEV da ZF (MS) da região de realização do reparo. O calor imposto (aporte de calor) adicional na junta quando da realização dos reparos provocou uma morfologia mais grosseira. O calor adicional imposto pelo reparo com o processo TIG cria uma região onde os grãos ficam menos orientados e pouco maiores, apresentando uma região da ZF

com grãos com geometria mais equiaxial. Esta região corresponde à parte central da ZF, onde não ocorrem diferenças significativas na direção de extração de calor, apesar da morfologia ser dendrítica não observa-se uma orientação preferencial das dendritas nas figura 43b e figura 43d. O calor adicional, condições de resfriamento heterogêneas com gradientes de temperatura e velocidade de solidificação diferentes e a relação Cr_{eq}/Ni_{eq} podem alterar a distribuição de elementos austenitizantes e ferritizantes.

(a) junta 1

(b) junta 4

(c) junta 1

(d) junta 4

Figura 43: Imagem obtida por MEV do centro ZF (a) e (c) junta 1 e (b) e (d) junta 4

Na figura 44a observa-se uma região da face da ZF ou MS próxima da interface com o MB, onde se verifica que as dendritas estão alinhadas na direção de máxima extração de calor. Na figura 44b e figura 44c a morfologia está razoavelmente diferente denotando a zona fundida, pois a microestrutura não está

direcionada. Na figura 44d são observados os grãos na região da ZF com orientações distintas. A orientação muda em razão do calor adicional do reparo.

Apesar destas mudanças microestruturais é difícil estabelecer uma relação destas alterações microestruturais com as propriedades mecânicas da junta.

Figura 44: Imagens obtidas por MEV da região da face da ZF - (a) condição 2, (b) condição 3 e (c) e (d) condição 4.

Na figura 45 é observada a região da raiz onde é mostrada a presença da descontinuidade falta de fusão de forma destacada. Esta descontinuidade não foi detectada nos ensaios de inspeção visual ou por líquidos penetrantes realizadas nas etapas anteriores do estudo.

(a) - junta 1

(b) – junta 2

(c) – junta 3

(d) – junta 4

(e) - junta 1

(f) – junta 3

Figura 45: Orientação dos grãos para área de extração de calor (a). Descontinuidades localizadas na raiz do cordão, (b), (c) e (d) imagens obtidas por microscopia óptica da interface (ZF) / (ZAC); (e) e (f) imagens obtidas por MEV.

A descontinuidade indicada na figura 45 estava presente em algumas amostras, independente da execução da soldagem e da quantidade de reparo. A presença desta descontinuidade na raiz do cordão contribuiu para reduzir todas as propriedades mecânicas (limite de ruptura, alongamento e resistência à

fadiga), causando uma elevada dispersão de resultados, como mostrado na tabela 8 e 9. Portanto, foi realizado um reparo na raiz em condições similares ao executado na face do cordão. O reparo da raiz foi realizado para eliminar a descontinuidade presente nesta região, conforme pode ser verificado na figura 46. Observa-se que a refusão desta região eliminou a descontinuidade na raiz e também provocou pequenas mudanças da microestrutura, como também ocorrido no reparo da face do cordão.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 46: Imagem obtida por MEV da região de reparo na raiz - (a), (b) e (c) junta 2 com 1 reparo da raiz e (d) junta 3 com 2 reparos da raiz.

A realização do reparo da raiz do cordão também conduziu a elevação dos resultados de propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de tração e fadiga, conforme descrito nas tabelas 8 e 9 de propriedades mecânicas.

Na figura 47 é notada a zona de ligação (interface entre a ZF e ZAC) e observam-se os fenômenos de fusão no contorno de grão e o maior tamanho de grão na ZAC próximo da ZF.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 47: Imagem obtida por MEV das zonas de ligações (a) e (b) junta 1 e (c) e (d) junta 4.

Em todas as condições de execução da junta podem ser observadas fusão no contorno de grão na ZL, no entanto para a condição 4 (soldagem MIG e 3 refusões) este fenômeno foi mais pronunciado, em razão do calor adicional dos reparos. A fusão no contorno de grão pode contribuir para a formação de trincas a quente do material, podendo reduzir a vida útil do componente. Conforme mencionado anteriormente, a presença de ferrita δ , em torno de 5 a 10% atenua a formação de trincas a quente ⁽⁵²⁾. Em qualquer condição as juntas soldadas mantiveram um teor de ferrita δ próximo deste valor.

A microestrutura da zona afetada pelo calor das juntas soldadas pode ser observada na figura 48a, sendo composta de matriz austenítica com grãos que sofreram crescimento em consequência do calor da soldagem e também, pela presença de ferrita δ residual proveniente das etapas de fabricação não eliminada pelo calor imposto da soldagem. Em regiões mais afastadas da zona fundida (metal de solda) pode ser observada uma microestrutura de material encruado, isto é, com grãos mais alongados na direção da conformação mecânica e ainda bandas de deformação, característica de material deformado a frio.

Figura 48: Imagens obtidas por microscopia óptica, (a) e (b) interface ZF/ZAC. Ataque eletroquímico com ácido oxálico.

Na figura 49 são observadas as regiões dos contornos de grão da ZAC com aumento de 500 vezes e 200 vezes atacados com ácido oxálico, conforme indicação da norma ASTM A 262 prática A ⁽⁶⁵⁾.

Em todas as condições de soldagem e reparo da junta usadas neste estudo não é verificada a ocorrência de sensitização do material, em razão da ausência de estrutura do tipo valeta (ataque pronunciado em todo o contorno de grão). Portanto, nestas condições de soldagem MIG e reparo por TIG de acordo com as imagens observadas não foram observados sinais corrosão intergranular, sendo aceitas pela norma ASTM A 262 prática A ⁽⁶⁵⁾.

(a) junta 1

(b) – junta 2

(c) – junta 3

(d) - junta 4

Figura 49: imagens obtidas por microscopia ótica, (a), (b), (c) e (d) região da ZAC. Ataque eletroquímico com ácido oxálico.

Na figura 50 podem ser verificadas as regiões de fratura das juntas estudadas. Verifica-se presença das microcavidades (“dimples”) que ocorrem quando a morfologia típica de fratura é do tipo dúctil. Esta morfologia foi observada em todas as amostras analisadas, quer sejam apenas soldadas ou soldadas com reparo, o que pode ser corroborado pelo comportamento mecânico da junta soldada alcançado nos ensaios mecânicos de dureza, tração e de fadiga.

(a) junta 1

(b) junta 1

(c) junta 2

(d) junta 3

(e) junta 4

(f) junta 4

Figura 50: Imagem obtida por MEV; (a) e (e) fratura da ZF; (b),(c), (d) e (f) imagem da ZF com a presença de microcavidades (“dimples”).

6. CONCLUSÕES

A retirada do reforço das juntas soldadas diminuiu a tensão de ruptura em 27% e o alongamento em 58% no ensaio de tração; portanto, a presença do reforço do cordão é indicativa de melhoria a integridade da junta quando submetida ao esforço de tração.

Observa-se redução da dureza da zona de fusão em relação ao material de base, mas que não compromete as propriedades mecânicas das juntas soldadas e submetidas ao reparo.

Os resultados dos testes de resistência à fadiga indicaram que as juntas com reforço, apenas soldadas com processo MIG apresentaram maiores quantidades de ciclos antes da ruptura, em relação às juntas com reforço submetidas ao reparo pelo processo TIG.

Em relação às juntas sem reforço que sofreram reparo por processo TIG, apresentaram número de ciclos antes da ruptura superiores em relação às juntas com reforço. A retirada do reforço e o reparo da raiz possibilitaram uma maior quantidade de ciclos sem o rompimento.

O reparo da solda apenas pelo lado da face, utilizando elevado aporte de calor não pode ser feito aleatoriamente, pois pode ocasionar a presença de descontinuidades (trincas) no lado oposto (lado da raiz).

O reparo da raiz da solda com processo TIG mostrou-se eficaz com consequente melhoria das propriedades mecânicas.

A microestrutura da zona de fusão (metal de solda) é predominantemente dendrítica. O aporte de calor adicional provocou uma morfologia mais grosseira.

Houve formação de fase ferrita δ durante a soldagem MIG e depois da 1ª refusão a porcentagem desta fase diminui aproximadamente em 20% e esta quantidade se mantém após a 2ª e 3ª refusões evidenciando que entre o processo MIG e o processo TIG há mudança da porcentagem, mas entre as refusões com processo TIG não são notadas grandes diferenças.

A análise por microscopia indicou que nas regiões que sofreram refusões, a morfologia dos grãos do MB próxima a ZAC apresentou crescimento dos grãos, no entanto não foram observadas diferenças significativas entre estas regiões com as juntas apenas soldadas com MIG.

Os resultados obtidos após a realização dos reparos usando o processo TIG indicaram que esta técnica é eficaz, pois provocaram a eliminação de descontinuidades na zona de fusão e não reduziram as propriedades mecânicas da junta soldada. No entanto, as condições de reparo devem ser analisadas para não provocar descontinuidades em outras regiões da junta soldada.

7. Bibliografia

1. **Standard, European.** NF EN 12663. *Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies*. July 2001. p. 5.
2. *Soldagem a laser*. **Bracarense, Alexander**. Universidade Federal de Minas Gerais : s.n., 2008.
3. *Welding processes*. **Handbook, Welding**. 8ª, s.l. : Ed. R.L.O' Brien, Vol. Vol. 2, pp. 109-154.
4. Instituto Edubras. *Instituto Edubras*. [Online] 2009. [Cited: março 14, 2012.] http://www.cursoedubras.com.br/area.php?sub_cat=21.
5. **Almeida, SENAI Varginha CFP Aloysio Ribeiro de**. Soldador no Processo TIG. Varginha : s.n., 2004.
6. *Welding, Brazing and Soldering*. **Metals, American Society for and Handbook, ASM**. 9ª edition, 1994, Vol. 6, pp. 180-185; 226-229.
7. Infosolda.com.br. *Infosolda*. [Online] 2004. [Cited: 03 14, 2012.] <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem.html>.
8. **A-240A, ASTM**. Standard Specification for Chromium and Chromium Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. West Conshohocken, PA : s.n., 2006.
9. **A-176, ASTM**. Standard Specification for Stainless and Heat-Resisting Chromium Steel Plate, Sheet, and Strip. 2009.
10. **A-666, ASTM**. American Standard Testing Mechanical - Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar. 2003.
11. **283, ASTM A**. Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates. 2007.
12. **570, ASTM A**. Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Carbon, Hot-Rolled. Withdrawn : s.n., 2000.
13. **380, ASTM A**. Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems. 2005.
14. **Neves, M.D.M., et al**. Solidificação da zona de fusão na soldagem do AISI 304 com inonel 600 por laser de =d:YAG. 2009.
15. **Tavares, Caio Fazzioli**. Influência da composição química e da espessura da peça fundida na quantidade e distribuição de ferrita delta em aços inoxidáveis austeníticos. Engenharia de Metalurgia e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo : s.n., 2008. pp. p.24-25. .; ;.
16. **Otubo, Douglas de Oliveira Passos e Prof. Doutor Jorge**. A influência da ferrita delta em aços austeníticos forjados. 2010.
17. **Labmat, Grupo**. *Diagrama de Schaeffler*. <http://www.grupolabmat.com.br/diagrama-2.php> : s.n., Acesso em fev/2012 2012.
18. *Ferrita Delta*. **Barboza, Dr. José**. Ed. 6, São Bernardo do Campo : [www.revista do parafuso.com.br](http://www.revista.do.parafuso.com.br), 10 30, 2007. Acesso em 14/01/12.

19. **Filho, Pedro Pedrosa R.** Sistema computacional para determinação da taxa de diluição em soldadura. Universidade Federal do Ceará (UFC) : Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões.
20. **www.infosolda.com.br/artigos/metso106.pdf.** *Diluição.* 2003. Acesso em setembro de 2012.
21. **Filho, Pedro Pedrosa Rebouças, et al.** Measurement of welding dilution from images using active contours. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza; Campus do PICI : s.n., 2009.
22. **Railroads, Association of american.** Manual of Standards and Recommended Practices. New York : s.n., 1983; 1984.
23. **Standard, Railway Group.** Structural Requirements For Railway Vehicles. July 1994.
24. **Standard, European and Standard, French.** EN 12663. *Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies.* 2001.
25. **Art.6, ASME Sec V.** Liquid Penetrant Examination.
26. **Técnicas), ABNT (Associação Brasileira de Normas.** ABNT NBR 16030. *Ensaaios não destrutivos — Partículas magnéticas — Detecção de descontinuidades.* 2012. ABNT/ONS-058 Ensaaios Não Destrutivos.
27. **Técnicas), ABNT (associação Brasileira de Normas.** ABNT NBR 6002. *Ensaio não destrutivos - Ultra-som - Detecção de descontinuidades em chapas metálicas.* 20008. Comitê ABNT/ONS-058 Ensaaios Não Destrutivos.
28. **D1.1, AWS.** Code - Stainless Steel; American Welding Society; Inspeção Visual e descontinuidades na soldagem. 2010. pp. 221, 239.
29. *Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados.* **B, Norma Petrobras N1738 rev.** 2003, p. 12. SC 26 Soldagem.
30. **The American Society of Mechanical Engineers, ASME.** Methods for Liquid Penetrant Examination (PT). 2010. Vol. Sec.VIII; Apendice 8; Div 1.
31. **Dias, Alexandre de Oliveira.** Análise da influência dos parâmetros de pulsação na soldagem do aço inoxidável AISI 304 através do arame tubular AWS E 316L T1-4. Universidade Federal de Itajubá : s.n., junho 2009.
32. **E8M-11, ASTM E8 /.** Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2011.
33. **E466, ASTM.** Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. 2003.
34. **Stephens, Ralph I, et al.** Metal Fatigue in Engineering. 2001. 2ª Ed, pp. 401 – 427.
35. **Tso, L. T., Chin, P. F. and Peng, H. C.** Effect of weld geometry and residual stresses on fatigue in butt welded joints. s.l. : Int. Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002. Vol. 79, pp. 467-482;.
36. **Figueiredo, SENAI-CFP Nadir Dias de.** Apostila de soldagem. Osasco : s.n., 1998.

37. *Repair welding of polymer injection molds manufactured in AISI P20 and VP 50IM steels.* **T., Preciado W. and Bohorquez, C. H.N.** 179, 2006, Materials Processing Technology, pp. 244–250.
38. *Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding.* **M.Vedani.** [ed.] J. Mater. Sci. 39, Milan : s.n., 2004, pp. p. 241–249.
39. *Handbook of mould, tool and die repair welding.* **Thompson, S.** 1^a ed, London : s.n., 1999, pp. 224-229. Abington Publishing Limited.
40. *Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load.* **Huo, L., Wang, D. and Y., Zhang.** [ed.] International Journal of Fatigue. 27, 2005, pp. 95–101.
41. *Design fatigue strength of TIG-dressed welded joints in high-strength steels subjected to spectrum loading.* **T., Dahle.** 20, s.l. : International Journal of Fatigue, 1998, pp. 677–81.
42. *Comportamento à fadiga de juntas soldadas de tubulações marítimas tratadas pela técnica TIG Dressing.* **M.C.S., Albuquerque.** 2004, pp. 45-54.
43. *Weld detail fatigue life improvement techniques - Part 2.* **K.J., Kirkhope, et al.** 12 1999, pp. p. 477- 496. disponível em www.elsevier.com, acesso em 07/10/08..
44. *Numerical Simulation of Tig-Dressing of Welded joints.* **Jorg Hildebrand, Idna Starcevic, Frank Werner, Heinz Heinemann, G Kohler.** [ed.] Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering. Montreal-Canada : s.n., 2006.
45. *Repair welding of cracked steam turbine blades using austenitic and martensitic stainless-steel consumables.* **Bhaduri, A.K., et al.** [ed.] Nuclear Engineering and Design. 206 , (2001, pp. P. 249–259.
46. *Examples of repair welding of heavy machinery subject to breakage due to low frequency alternating stresses.* **Desir, J. L.** 8, s.l. : Engineering Failure Analysis, 2001, pp. 423-437.
47. *Fatigue lifetime assessment procedures for welded pressure vessel components.* **Rudolpk, J., Schmitt, C. and E., Weiß.** 2002, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 79, pp. 103-112. disponível em www.elsevier.com, acesso em 07/10/08.
48. *Achieving cost savings with innovative welding and examination techniques.* **Messer, et al.** 83, 2006, International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 365–372.
49. <http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT11.pdf>. *Tensões e Deformações em Soldagem.* Vol. Capítulo 11. Acesso em setembro de 2012.
50. **Modonesi, Marques and Santos.** Fissuração em Juntas soldadas. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de Minas Gerais 2008. pp. 3-9. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de Minas Gerais.
51. **Bernasconi, Rodolfo Cosentino – Eduardo.** *Aços inoxidáveis para equipamentos e instalações farmacêuticas - 2a Parte.* www.giltec.net/functions/download; acesso em 22/09/12.

52. *Solidification cracking susceptibility of fully austenitic stainless steels, report 1: fundamental investigation on solidification behavior of fully austenitic and duplex Microstructures and Effect of ferrite on Microsegregation.* **Yoshiaki, Arata and Katayama, S.** Osaka : s.n., 1976, Welding Journal, pp. 59(2):48s-58s. Transactions of JWRI, 5(2):135.) .
53. **Souza, Juliana P. B., et al.** Análise da resistência a corrosão por pite em soldas de reparo pelo processo TIG em aço inoxidável superduplex UNS S32750. [ed.] Universidade Federal Fluminense. 2010.
54. *Estudo da Sensitização Causada Pelo Ciclo Térmico de Soldagem no Aço Inoxidável.* **Silva, Cleiton Carvalho, et al.** Universidade Federal do Ceará : s.n., 2005. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.
55. **G108, ASTM.** Standard Test Method for Electrochemical Reactivation (EPR) for Detecting Sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels. 94(2010). Vol. 3.2.
56. **KOTECKI, JOHN C. LIPPOLD e DAMIAN J.** WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS . New Jersey, USA : Ed. John Wiley & Sons , Inc., 2005.
57. *Austenitic stainless steels - microstructure and mechanical properties.* **Marshall, P.** s.l. : Elsevier Applied Science, 1984, p. p. 68.
58. *Transformation of delta ferrite during high heat input welding of austenitic stainless steel.* **KAIN, V., DE, P. K.** 2003, Vols. 42, n. 3, pp. 50-54. Materials Performance,: NACE International,(Kain & De, 2003; Davis).
59. **Acesita.** Soldagem dos aços inoxidáveis. 1996. disponível em: https://www.google.com.br/search?q=Fonte:+Apostila+A%C3%A7o+Inox+Soldagem-ACESITA&sa=N&espv=2&biw=839&bih=1450&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ved=0ahUKEwjQgaz28dbLAhVlvJAKHQR_BII4ChCwBAgy#imgsrc=pa3rUDV36TCTuM%3A.
60. *Predicting IGSCC/IGA susceptibility of Ni-Cr-Fe alloys by modeling of grain boundary chromium depletion.* **Mayo, William E.** A252, s.l. : Materials Science and Engineering, 1997.
61. *Estudo da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis para Uso Na Parte Fria dos Sistemas de Exaustão de Veículos.* **Cunto, Julio Cesar Di.** SP, Brasil : s.n., 2005, p. p 7. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
62. **Almendra, Antônio Carlos, Ramalho, José Pinto and Jr, Luiz Gimenez.** Ensaio visual e dimensional. *Soldagem - Coleção Tecnologia Senai.* 1997, pp. 463-471.
63. **Hoepfner, D.W.** ASTM STP 648 Fatigue Testing of Weldments. 1978.
64. *Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers- NM ISO 6507-1:2008NM ISO 6507-1.* **Técnicas, ABNT - Associação Brasileira de Normas.** 2008.
65. **Testing), ASTM (Mechanical American Standard.** ASTM A 262-02a; Standard Practices for Detecting to intergranular Attack in Austenitic Stainless Steel. 2002. pp. 1-16.

66. **Engineers, ASME The American Society of Mechanical.** Section VIII Division 2; Rules For Construction Of Pressure Vessels; Acceptance Criteria for Liquid Penetrant Examination. 2007. Vol. 8, p. Item 7.5.7.2.
67. *Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures.* **Cheng, X, et al.** 2003, International Journal of Fatigue 25, p. p. 1259.
68. **Materials), ASTM (American Society for Testing and.** Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 1996.
69. *Solidification of austenitic stainless steel weldments,: the effect of alloy composition on ferrite morphology,.* **Lippold, J. C., and Savage, W.** 1980.
70. **Neves, Maurício David M. das, et al.** Solidificação da zona de fusão na soldagem do AISI 304 com inconel 600 por laser de Nd:YAG. s.l. : Revista Soldagem e Inspeção, Junho 2009.