UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

NESTOR FERREIRA DE CARVALHO

INFLUÊNCIA DO PASSE DE REVENIMENTO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO ÁCIDA EM AÇOS DE BAIXA LIGA

SANTOS/SP
2015

NESTOR FERREIRA DE CARVALHO

INFLUÊNCIA DO PASSE DE REVENIMENTO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO ÁCIDA EM AÇOS DE BAIXA LIGA

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e coorientação do Prof. Dr. Aldo Ramos Santos.

SANTOS/SP

2015

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Carvalho, Nestor Ferreira.

Influência do passe de revenimento na resistência à corrosão ácida em aços de baixa liga / N. F. Carvalho. - 2015
92 p.

Orientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2015.

1. Corrosão. 2. Passe de Revenimento. 3. Aços baixa liga.
4. Reparos com solda. 5. Alívio de tensões.

I.Moraes Junior,Deovaldo

II.Santos, Aldo Ramos

III. Título: Influência do passe de revenimento na resistência à corrosão ácida em aços de baixa liga.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Dalva, Renata e Maria Eduarda, minha esposa, sobrinha e afilhada que tiveram paciência para suportar minha dedicação em consolidar esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Á Deus por permitir que eu tenha tido a saúde e a disposição de concluir agora, um mestrado interrompido em 1976, quando ingressei em uma das maiores empresas de petróleo do mundo, a Petrobrás, onde tive uma carreira de 38 anos que me possibilitou um desenvolvimento técnico e gerencial de excelência.

A todo o pessoal do Laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília que acreditaram no meu projeto e me ajudaram de maneira decisiva a projetar, construir e realizar os testes de corrosividade.

Aos professores Dr. Deovaldo de Moraes Junior e Dr. Aldo Ramos Santos, respectivamente, orientador e coorientador deste trabalho que de maneira técnica, incansável e paciente me ajudaram, na realização dos testes e na elaboração desta dissertação.

Aos Engenheiros André de Carvalho, Luiz Antonio Bereta, Roberto Arthur Rodrigues Marson e o Técnico Bruno Lopes Capriotti, na ajuda durante a elaboração dos corpos de prova e análises metalográficas.

Aos Técnicos do Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA Irineu Penha da Ressureição, Volnei de Lemos, pela ajuda na montagem dos equipamentos para os testes de corrosividade,

Aos alunos que desenvolveram seu trabalho de conclusão de curso em corrosão Adriano Rocha Teixeira, Laís Palason Almeida, Raissa Fernandes Valente, Renata Maria Araújo De Oliveira, Thammiryz Gomes Bohn, Thaysa De Oliveira e principalmente Thais Barros Da Silva e Marco Cesar Dias Matos, pela dedicação e disposição na realização dos ensaios no sistema de circulação, na preparação das soluções de teste e no acompanhamento dos testes.

Ao Engenheiro químico Rodrigo Freire, pela contribuição em todas fases do projeto e na difícil tarefa de dar um destino adequado, sem contaminação do meio ambiente, nas soluções usadas nos testes.

Ao Prof. Msc. Vitor da Silva Rosa, pelas orientações referentes a análise estatística dos dados.

RESUMO

No início do segundo milênio, após inúmeras experiências realizadas por diferentes centros de pesquisa, começou a ser aplicado na indústria o procedimento de soldagem usando o passe de revenimento, como uma técnica alternativa de reparos com solda, tendo como objetivo substituir a necessidade de refazer o tratamento térmico após intervenções com solda em vasos de pressão. Muitos artigos, dissertações e teses têm sido escritos sobre as vantagens e desvantagens técnicas do uso do passe de revenimento, sempre com a intenção de definir variáveis de soldagem que propiciem a melhor recuperação estrutural e melhores propriedades mecânicas da junta soldada. Este trabalho avaliou a influência na resistência à corrosão da aplicação do passe de revenimento de maneira comparativa, usando como metal base tubos de aço com 2,25Cr1Mo, unidos com soldas sem tratamento, tratada e com passe de revenimento. Os testes de corrosividade foram feitos através de imersão em uma solução de ácido sulfúrico, na concentração inicial de 0,25 molar, tendo como base manter o pH do meio abaixo de 3, por cerca de 15 dias de exposição. Foram realizados dois testes, um com imersão na solução estagnada e o outro com a solução circulando a uma velocidade entre 0,6 e 0,7 metros por segundo. A análise dos resultados foi feita comparando as superfícies corroídas, as taxas de corrosão, microestruturas e durezas das soldas e metal base. Nos testes de corrosividade, a resistência à corrosão do espécime soldada com passe de revenimento foi inferior a obtida para a espécime contendo a solda tratada e superior a espécime com a solda sem tratamento. As taxas de corrosão calculadas para os espécimes na condição estagnada foram menores do que as calculadas para o meio com circulação.

Palavras Chave: Corrosão. Passe de Revenimento. Aços baixa liga. Reparos com solda. Alívio de tensões.

ABSTRACT

Early in the second millennium, after numerous experiments carried out by different research centers, the industry implemented the welding procedure using the temper bead, as repairs welding technique alternatives, aiming to replace the need to redo heat treatment after interventions with weld in pressure vessels. Many articles, dissertations and thesis wrote about the advantages and disadvantages of using temper bead, always with the intended to specify the welding variables that provide the best structural recovery and better mechanical properties of the weld. This study evaluated the influence the temper bead on the corrosion resistance in a comparative way, using as a base metal, steel tubes with 2,25Cr-1Mo, united with welds untreated, treated and temper bead. The corrosion tests were performed by immersion in a sulfuric acid solution, the initial concentration of 0.25 molar and controlled on the medium to keep the pH below 3, for about 15 days exposure. Two tests were performed, one with solution stagnant and the other with the solution circulating at a rate between 0.6 and 0.7 meters per second. In the corrosion analysis considered the corrosion rate, microstructure and hardness of the welds. The corrosion rate of the weld with temper bead was more than the treated weld and lower than no treatment weld. The corrosion rate in the stagnant condition was lower than the corrosion rate measured in the middle with circulation.

Keywords: Corrosion. Temper bead. Low alloy steels. Repairs with welding. Relief of stresses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de fase Ferro/Cementita, mostrando as microestruturas de um aço com 0,2% de carbono, resfriado lentamente (recozimento) após austenitização. 20
Figura 2.2 – Esquema simplificado do diagrama TTT de um aço eutetóide..... 21
Figura 2.3 – Microestrutura de um aço com 2,25Cr1Mo recozido, mostrando grãos de perlita (áreas escuras) e ferrita (área branca). Ataque com 2 % nital..... 22
Figura 2.4 – Microestrutura de um aço 2,25Cr1Mo na condição normalizado e revenido. Ataque com 2% nital..... 22
Figura 2.5 – Microestrutura de um aço baixa liga resfriado em água, mostrando a martensita. Ataque com 2% nital e aumento de 500X..... .23
Figura 2.6 – Efeito da temperatura de revenido na dureza e tenacidade de um aço carbono com 0,45%C temperado..... 23
Figura 2.7 – Microestrutura de um aço baixa liga, resfriado em água e revenido a 650^0C. Martensita revenida e carbonetos esferoidizados. Ataque com 4% picral + 2% nital. Aumento de 1000X..... 24
Figura 2.8 – Microestrutura de um aço com 2,25Cr-1Mo..... 25
Figura 2.9 – Localização da zona fundida e ZTA de uma solda..... 26
Figura 2.10 – Formação das zonas fundida, transição e zta de uma solda..... 28
Figura 2.11 – Constituintes formados com taxas de resfriamento diferentes..... 29
Figura 2.12 – Diagrama CCT do aço baixa liga 2,25Cr-1Mo (ASTM-A-335 gr. P22). 30
Figura 2.13 – Regiões formadas durante a soldagem..... 30
Figura 2.14 – Revenimento da ZTA com o passe de revenimento. Passe de revenimento (linhas cheias), solda revenida (linhas tracejadas)..... 32
Figura 2.15 – Taxas de corrosão das microestruturas de um aço carbono imerso em solução aquosa com 3,5% NaCl.....35
Figura 2.16 – Nível de confiança de uma amostra com distribuição normal.....38
Figura 2.17 – Influência do grau de liberdade na distribuição t.....38
Figura 3.1 – Tubo em meio cana, onde foram realizadas as soldas do corpo de prova.....40
Figura 3.2 – Esquema da junta soldada usada em todas as soldas.....41
Figura 3.3 – Marcação para o corte dos espécimes para o teste de corrosividade, são três espécimes de cada solda e mais três do metal base..... 42
Figura 3.4 – Exemplo de uma espécime para teste de corrosividade após corte do corpo de prova – a) raiz da solda; b) acabamento da solda..... 44
Figura 3.5 – a) Vista frontal total da nave construída para realizar o ensaio; b) vista lateral da cuba de teste (superior) com o detalhe dos tubos piezométricos para medida da velocidade..... 46
Figura 3.6 – Cuba usada para o teste na condição estagnada. Estão indicados o dia e hora de início do teste..... 47
Figura 3.7 – Aspectos da superfície dos espécimes após a limpeza, antes da imersão. 47
Figura 4.1 – Comparação de energia de soldagem do passe de enchimento das três soldas..... 50
Figura 4.2 – Tamanho da ZTA em cada solda. Macrografia com ataque de nital 5% e aumento de 10x..... 51

Figura 4.3 – Microestrutura do tubo onde foram preparados os corpos de prova. Observa-se grãos de ferrita (A) e carbonetos precipitados no interior dos grãos da ferrita (B). Ataque com nital 5% e aumento de 500x.....52
Figura 4.4 – Microestruturas da ZTA das soldas – (A) grãos de ferrita alongados; (B) ilhas de carbonetos; (C) carbonetos esferoidizados. Ataque de nital 5% e aumento de 1000x.....53
Figura 4.5 – Microestrutura do metal depositado (zona fundida) – a) martensita; b) martensita revenida; c) martensita parcialmente revenida.....54
Figura 4.6 – Valores de dureza medidos..... 55
Figura 4.7 – Durezas medidas na almofada e superfície da solda com passe de revenimento..... 55
Figura 4.8 – Evolução do hidrogênio constatado no primeiro dia de exposição.....55
Figura 4.9 - Início da dissolução do metal, observado no primeiro dia de exposição. 56
Figura 4.10 – Turbidez das cubas após 10 dias de exposição impossibilitando a visualização dos espécimes em teste.....56
Figura 4.11 – Observação de um dos espécimes em teste após 10 dias de exposição, com o auxílio de iluminação externa direta devido a turbidez do meio.....57
Figura 4.12 – Todas as amostras antes e após a exposição ao meio.....57
Figura 4.13 – Variação do pH e temperatura da solução durante o teste, na cuba com o meio circulante.....58
Figura 4.14 – Superfície do espécime sem solda, antes e após a exposição.....59
Figura 4.15 – Comparação da solda sem tratamento antes e após a exposição.....60
Figura 4.16 – Espécime com tratamento antes e após a exposição.....60
Figura 4.17 – Espécime com passe de revenimento antes e após a exposição.....61
Figura 4.18 – Variação do pH e temperatura da solução durante o teste, na cuba com o meio estagnado.....62
Figura 4.19 – Superfície dos espécimes antes e após a exposição, no meio estagnado.....62
Figura 4.20 – Espécimes soldadas sem tratamento antes e após exposição, no meio estagnado.....63
Figura 4.21 – Espécimes soldadas com tratamento antes e após a exposição no meio estagnado.....63
Figura 4.22 – Espécimes soldadas com passe de revenimento antes e após exposição no meio estagnado.....64
Figura 4.23 – Intervalo de confiança das taxas de corrosão, no meio com fluxo.....65
Figura 4.24 – Comparação das taxas de corrosão médias, para o meio com fluxo.....66
Figura 4.25 – Intervalo de confiança das taxas de corrosão, no meio estagnado.....67
Figura 4.26 – Comparação das taxas de corrosão médias, para o meio estagnado...68
Figura 5.1 – Comparação da taxa de corrosão dos espécimes.....70
Figura 5.2 – Aumento na taxa de corrosão dos espécimes soldados em relação ao espécime sem solda.....72
Figura 5.3 - Presença de pequenos vales na ZTA de cada passe nas soldas sem tratamento e com passe de revenimento.....72
Figura 5.4 – Relação entre taxa de corrosão, dureza e microestrutura, no meio estagnado.....74
Figura 5.5 – Relação entre a resistência à corrosão das soldas e o metal base.....74
Figura 5.6 – Influência da velocidade do meio e do volume da solução nas taxas de corrosão.....75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constituintes das soluções de nital e picral..... 25
Tabela 3.1. Composição química retirada da especificação ASTM A 335 gr.P22 – UNS K21590..... 40
Tabela 3.2 – Especificação e composição química dos consumíveis adquiridos..... 42
Tabela 3.3 – Características das metalografias preparadas..... 43
Tabela 3.4 – Identificação dos espécimes para o teste de corrosividade..... 44
Tabela 3.5 – Área da superfície de exposição dos espécimes..... 45
Tabela 4.1 – Análise química do metal base..... 48
Tabela 4.2 – Análise química do metal depositado..... 48
Tabela 4.3 – Principais variáveis da Solda sem tratamento térmico após a soldagem. 49
Tabela 4.4 – Principais variáveis da solda com tratamento térmico após a soldagem. 49
Tabela 4.5 – Principais variáveis da solda com amanteigamento nas bordas da junta e passe de revenimento..... 49
Tabela 4.6 – Taxas de corrosão calculadas dos espécimes expostas no meio com circulação..... 59
Tabela 4.7 – Taxas de corrosão calculadas dos espécimes expostas no meio estagnado.....64
Tabela 4.8 – Intervalo de confiança das taxas de corrosão para o meio com fluxo...65
Tabela 4.9 – Intervalo de confiança das taxas de corrosão para o meio estagnado...66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	–	*American Petroleun Institute*
ASM	–	*American Society for Metals*
ASME	–	*American Society of Mechanical Engineers*
ASTM	–	*American Society for Testing and Materials*
AWS	–	*American Welding Society*
CCC	–	Estrutura Cúbica de Corpo Centrado
CCD	–	*Charge Couple Device*
CCT	–	*Continuous Cooling transformation*
CFC	–	Estrutura Cúbica de Face Centrada
CT	–	Solda com Tratamento
CPR	–	Solda com Passe de Revenimento
EPRI	_	*Electric Power Research Instituti*
ER	_	Eletrodo Revestido
HV	_	*Hardness Vickers*
MB	_	Metal Base
MS	_	Metal de Solda depositado
NACE	_	*National Association of Corrosion Engineerings*
NR13	_	Norma Regulamentadora $N^0$13
PCC	_	*Post Construction Committe*
pH	_	Concentração de íon Hidrogênio
PR	_	Passe de Revenimento
PRE	_	*Pitting Resistance Equivalent*
PWHT	_	*Post Weld Heat Tretament*
RRAC	_	*Repair & Replacement Applications Center*
Schedule	_	Espessura padronizada para tubulações
SCC	_	*Stress Corrosion Cracking*
SEM	_	*Scanning Electron Microscopy*
ST	_	Sem Tratamento térmico após a soldagem
TIG	_	*Tungsten Inert Gas*
TTT	_	Diagrama Temperatura, Tempo e Transformação
XRF	_	Fluorescência de Raios X
ZTA	_	Zona Termicamente Afetada pelo Calor da soldagem

LISTA DE SÍMBOLOS

C	–	Elemento químico Carbono
Cr	–	Elemento químico Cromo
Fe	–	Elemento químico Ferro
Mo	–	Elemento químico Molibdênio
ɣ	–	Fase Austenita
α	–	Fase Ferrita

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO**.....14
1.1 OBJETIVO.....17

2 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**.....18
2.1 AÇOS BAIXA LIGA.....18
2.2 PASSE DE REVENIMENTO.....26
2.3 RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO BAIXA LIGA.....32
2.4 INFLUÊNCIA DA SOLDA NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO.....33
2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....36

3 **MATERIAL E MÉTODOS**.....40
3.1 MATERIAL APLICADO.....40
3.2 PREPARAÇÃO DAS SOLDAS.....41
3.3 ANÁLISES METALOGRÁFICAS.....42
3.4 DUREZAS.....43
3.5 TESTE DE CORROSIVIDADE.....44

4 **RESULTADOS**.....48
4.1 MATERIAIS APLICADOS.....48
4.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.....48
4.3 ANÁLISES METALOGRÁFICAS.....50
4.3.1 MACROGRAFIAS.....50
4.3.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA DO METAL BASE.....51
4.3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA DA ZTA.....52
4.3.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA DO METAL DEPOSITADO.....53
4.4 DUREZAS.....54
4.5 TESTE DE CORROSIVIDADE.....55
4.5.1 TESTES NA CUBA COM O MEIO EM CIRCULAÇÃO.....58
4.5.2 TESTES NA CUBA COM O MEIO ESTAGNADO.....61
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....64
4.6.1 TESTE ESTATÍSTICO NO MEIO COM FLUXO.....65
4.6.2 TESTE ESTATÍSTICO NO MEIO ESTAGNADO.....66

5 **DISCUSSÃO**.....69

6 **CONCLUSÃO e SUGESTÕES**.....76

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....78

APÊNDICE A – Cálculo das áreas das superfícies expostas ao meio 82

APÊNDICE B – Cálculo do intervalo de confiança nas taxas de corrosão.....85

ANEXO A - Análise química do metal base e solda com passe de revenimento....89

ANEXO B - Análise química da solda sem tratamento.....91

ANEXO C - Análise química da solda com tratamento.....92

1 INTRODUÇÃO

Desde 1911 a *American Society of Mechanical Engineers (ASME)* criou um comitê que estabeleceu regras para a fabricação e montagem de caldeiras e vasos de pressão (ASME I, 2013). Nessa época a união por solda não tinha muita credibilidade, provavelmente por se tratar de um processo novo.

Por volta de 1940 as indústrias de armamentos começaram a utilizar mais largamente os processos de soldagem na construção de equipamentos para uso na segunda guerra mundial. A utilização da união pelo processo de soldagem possibilitou o desenvolvimento de equipamentos mais robustos, mais resistentes e principalmente, construídos em menos tempo. Mas nem todos os projetos soldados tiveram sucesso. Projetos com resultados catastróficos retardaram a credibilidade da união por solda. Dentre os projetos soldados que falharam catastroficamente, provavelmente, o mais famoso seja a fabricação de 2500 navios *Liberty* para a poderosa esquadra Inglesa, que após serem colocados no mar, 145 navios romperam e 700 apresentaram falhas menores, antes de serem usados. Posteriormente, os estudos dessas falhas mostraram que o problema não estava associado a soldagem, mas as baixas temperaturas e a presença de trincas em pontos com concentração de tensões, por falha de projeto (BROEK, 1982).

Após a segunda guerra, com a explosão do desenvolvimento industrial veio a necessidade da construção de vasos de pressão, caldeiras, tubulações, fornos e outros equipamentos para a geração de energia, bem como para a produção e refino do petróleo. Nesse novo cenário, os processos de soldagem foram eleitos como a melhor alternativa para garantir equipamentos seguros com menor custo e menores prazos de fabricação. Esse desenvolvimento ocorreu junto com o aprimoramento e constante atualização do Código *ASME*, considerado, atualmente, como o melhor e mais usado código de fabricação, montagem, inspeção e testes para vasos de pressão, caldeiras e tubulações. Portanto, hoje a especificação de processos de soldagem para equipamentos industriais ou estruturas que exigem alto nível de segurança deve seguir os requisitos dos códigos *ASME* e da sociedade americana de soldagem *(AWS – American Welding Society)*.

A seção IX do código *ASME* descreve os requisitos que devem ser seguidos para a qualificação dos procedimentos de soldagem a serem usadas nas soldas em vasos de pressão, caldeiras e tubulações. Essa qualificação é a garantia que a união

terá a resistência mecânica desejada (ASME IX, 2013).

No Brasil a Norma Regulamentadora 13, emitida pelo Ministério do Trabalho e Emprego, descreve as regras a serem usadas no projeto, operação, inspeção e manutenção de vasos de pressão, caldeiras e tubulações. No item 13.3.3 fica estabelecido que todos os equipamentos devem respeitar o código de projeto e pós construção no que se refere a procedimentos de execução (NR13, 2014), ou seja todo processo de soldagem deve atender aos requisitos de um código de fabricação ou de pós construção.

Até o início de 2005 as empresas aplicavam nas soldas de manutenção procedimentos de soldagem qualificados com os requisitos de vasos novos, pela falta de padronização específica para soldas de manutenção. Em 2004, o comitê do código *ASME* emitiu uma padronização para reparos em vasos que já operam, com o nome de *Post Construction Commitee* (PCC). (ASME PCC2, 2011). A partir de 2011, grande parte das empresas tem usado o PCC 2, como referência para realizar reparos em vasos de pressão, caldeiras e tubulações, pois são regras que levam em consideração características específicas relacionadas a manutenção, como a realização dos serviços no local onde os equipamentos estão instalados e não no pátio de uma fábrica, além disso, esses procedimentos são mais adequados para materiais e soldas que já foram pressurizados.

Um dos procedimentos mais usados na reconstrução de soldas onde foram removidos defeitos ou na reposição de espessura é o procedimento de soldagem denominado de passe de revenimento (*temper bead welding*).

O centro de pesquisas do *Electric Power Research Instituti (EPRI), divisão de Repair & Replacement Application Center (RRAC)* (2002), tem realizado inúmeras pesquisas sobre à aplicação do passe de revenimento, definida como uma técnica que utiliza o controle das principais variáveis de um procedimento de soldagem, para melhorar as propriedades mecânicas do metal depositado e do metal base afetado pelo calor da solda (ZTA). Por muitos anos estudiosos dos processos de soldagem reconhecem que um procedimento de soldagem realizado com controle de energia, *heat imput*, pode melhorar ou até restaurar as propriedades mecânicas da zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), região considerada como a mais crítica após uma solda (SPERKO, 2005).

Os códigos de fabricação, como o *ASME*, indicam o tratamento térmico pós soldagem *(PWHT)* como o método mais indicado para recuperar as propriedades

mecânicas da solda e metal base afetado pelo calor da solda (ZTA), para vasos novos. (SPERKO, 2005).

Nas soldas de manutenção, onde as condições de execução são muito diferentes das condições de fabricação, a execução de um tratamento térmico após a soldagem pode ser desejada, mas, na maioria das vezes, não é prático e seu uso pode até levar a perda do equipamento. O procedimento de soldagem com o passe de revenimento pode substituir o tratamento térmico após a soldagem, com vantagens e resultado similar de propriedades mecânicas (SPERKO, 2005).

Os atuais códigos de pós construção (PCC), já reconhecem que o uso do controle das variáveis de soldagem aliado a um procedimento de deposição estudado pode levar a um resultado similar ao tratamento térmico após soldagem.

O *ASME* seção IX, define a soldagem com passe de revenimento como: “a colocação de um cordão de solda em uma localização específica sobre uma superfície soldada, com o propósito de melhorar as propriedades metalúrgicas da zona afetada pelo calor do metal base ou de um metal de solda já depositado” (ASME IX, 2013).

Os códigos de pós construção, tem requisitos de qualificação similares aos de fabricação, onde o objetivo é garantir a resistência mecânica e a tenacidade da junta, sem preocupação com a resistência à corrosão. Inclui-se nesses requisitos a exigência de tratamento térmico após soldagem que tem como objetivo o restabelecimento do limite de escoamento e tenacidade da junta soldada.

O uso cada vez maior, nos serviços de manutenção, de procedimentos alternativos de soldagem, como o passe de revenimento, tem levado a inúmeros estudos sobre a influência das principais variáveis de soldagem sobre a microestrutura e dureza final da solda e ZTA, visando a obtenção de uma resistência mecânica e a tenacidade adequados da junta. Pouco se tem estudado da influência dos procedimentos de soldagem alternativos, como o passe de revenimento, na resistência à corrosão. Este trabalho teve como objetivo fazer uma avaliação da influência do procedimento de soldagem com passe de revenimento, em aços baixa liga cromo e molibdênio, na especificação ASTM A 335 grau P22, na resistência à corrosão em meio ácido. O estudo foi feito através da comparação da taxa de corrosão de corpos de prova, preparados das seguintes maneiras: sem solda; soldado, sem tratamento térmico de alívio de tensões; soldado, com tratamento térmico de alívio de tensões; e soldado com passe de revenimento. Foi testada a

resistência à corrosão de oito corpos de prova imersos em uma solução de ácido sulfúrico na concentração 0,25 molar e temperatura ambiente. Quatro corpos de prova foram imersos, por 15 dias, em uma cuba de teste com a solução na condição estagnada e os outros quatro foram imersos na mesma solução, concentração e temperatura, mas com a solução circulando numa velocidade entre 0,6 e 0,7 metros por segundo. Após a exposição, foi realizada uma análise técnica sobre as taxas de corrosão medidas.

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho foi analisar a influência na resistência à corrosão quando se executam reparos com solda usando o passe de revenimento, como uma etapa do procedimento de reparos, na recuperação de partes pressurizadas de vasos de pressão, construídos com aço 2,25Cr1Mo.

Os objetivos específicos foram:

a) Avaliar de maneira comparativa três espécimes preparadas com processos de soldagem diferentes, todos realizados com variáveis essenciais de soldagem iguais, tendo como diferença o tratamento térmico após a soldagem. Em um dos espécimes a solda não foi tratada após a soldagem, em outra foi realizado o procedimento de passe de revenimento e na terceira espécime a solda foi tratada para alivio de tensões, seguindo os requisitos dos códigos de construção para vasos de pressão.

b) Para os testes de corrosividade foram construídas duas cubas uma com circulação do meio e a outra com o meio estagnado. Em ambas as cubas foi utilizado como meio corrosivo uma solução aquosa de ácido sulfúrico, com pH menor do que 3.

c) A comparação da resistência à corrosão dos espécimes foi realizada com base nas taxas de corrosão calculadas e características das superfícies corroídas, bem como das microestruturas e durezas das soldas, zonas termicamente afetadas pelo calor e metal base.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Faz-se uma revisão dirigida aos assuntos envolvidos na execução dos testes e nas análises dos resultados.

2.1 AÇOS BAIXA LIGA

Normalmente, equipamentos e tubulações usados nas plantas de geração de energia, processos químicos, papel e celulose e processamento de petróleo tem a especificação do material a ser usado com base na máxima temperatura de projeto. Assim, aços carbono são usados para aplicações até 370^0C, aços carbono com adição de 0,5% de molibdênio são empregados até 540^0C, enquanto que aços liga, com 0,5 a 9% de cromo, combinado com 0,5 a 1,0% de molibdênio são especificados para temperaturas até 650^0C. Acima desse valor, são usados aços inoxidáveis (AGGEN, C.; AKSTENS, F. W.; ALLEN, C.M.; et al., 1993).

O volume 1 do *Metals Handbook* define como aços de baixa liga, todo aço carbono cuja soma dos elementos de liga, adicionados na sua formulação, seja inferior a 8% em peso. O material em estudo é um aço baixa liga, com 2,25% de cromo e 1,0% de molibdênio (2,25Cr-1Mo) que tem como limite máximo de temperatura 540^0C. Esta limitação está relacionada ao início do processo de fluência significativo e a possibilidade de grafitização, que é mais provável, após 580^0C (AGGEN, C.; AKSTENS, F. W.; ALLEN, C.M.; et al., 1993).

Esses aços, usados na construção de equipamentos pressurizados, são fabricados conforme os requisitos do código ASTM *(American Society for Testing and Materials)* sendo entregues normalizados e revenidos a 675^0C (ASTM A 335, 2011), quando especificado, são recozidos depois. Os aços de baixa liga, com teor de carbono abaixo de 0,20%, contendo 2,25Cr-1Mo, tem uma estrutura policristalina, contendo milhares de grãos unidos por contornos de grãos. Esses últimos tem uma maior energia, mais impurezas e um grau maior de desordem que podem levar a propriedades de resistência à corrosão diferente da observada no interior dos grãos. A microestrutura desses aços é formada por uma solução sólida de átomos de ferro, contendo átomos intersticiais de carbono ou substitucionais de cromo e molibdênio. A maioria das ligas, além dos elementos dissolvidos na matriz, apresentam fases formadas pelos átomos não dissolvidos. Nesses aços, a fase preferencialmente, são

carbonetos de ferro, chamados de cementita (Fe_3C). As soluções sólidas formadas são chamadas de fases e representadas por símbolos, como α, β, ɣ, etc. A fase é uma região do material com propriedades físicas e químicas uniformes, essa é a importância de se identificar as fases de uma microestrutura (ASHBY; et al., 1999).

A identificação das fases de uma liga é feita através do diagrama de fases que identifica quais as fases de uma liga, quando resfriada lentamente. O diagrama de fases ferro/cementita da Figura 2.1 mostra as fases e compostos do aço carbono resfriado lentamente a partir da austenitização (recozimento). A linha vermelha colocada na Figura 2.1 mostra o teor máximo de carbono presente nos aços baixa liga, que se enquadram na especificação ASTM-A-335 gr. P22 (AGGEN, C.; AKSTENS, F. W.; ALLEN, C.M.; et al., 1993). Acompanhando a linha vermelha observam-se as microestruturas seguintes (BRAMFITT, 2004).

a) entre 1150 e 850^0C: observa-se cementita (pontos pretos) dispersa em uma matriz austenítica. Austenita é uma fase, formada por uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura cúbica de face centrada (CFC) e a cementita uma fase metaestável de estrutura ortorrômbica, que acomoda mais átomos de carbono do que a austenita;
b) em 850^0C: temos grãos de austenita, cementita (pontos pretos) dispersa e início da nucleação da ferrita nos contornos dos grãos da austenita, chamado de ferrita pró-eutetóide, por ter sido gerada antes da linha AC1 (723^0C). A ferrita é uma solução sólida de carbono em ferro com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC);
c) entre 850 e 723^0C: verifica-se a presença de grãos de austenita, cementita (pontos pretos) dispersa, crescimento dos grãos de ferrita e nucleação de novos grãos de ferrita, todas pró-eutetóide;
d) em 723^0C: grãos de ferrita pró-eutetóide e a transformação da austenita e cementita em perlita. A perlita é um composto eutetóide formado por placas (lamelas) alternadas de ferrita e cementita;
e) temperatura ambiente: a estrutura é formada por grãos de perlita e ferrita.

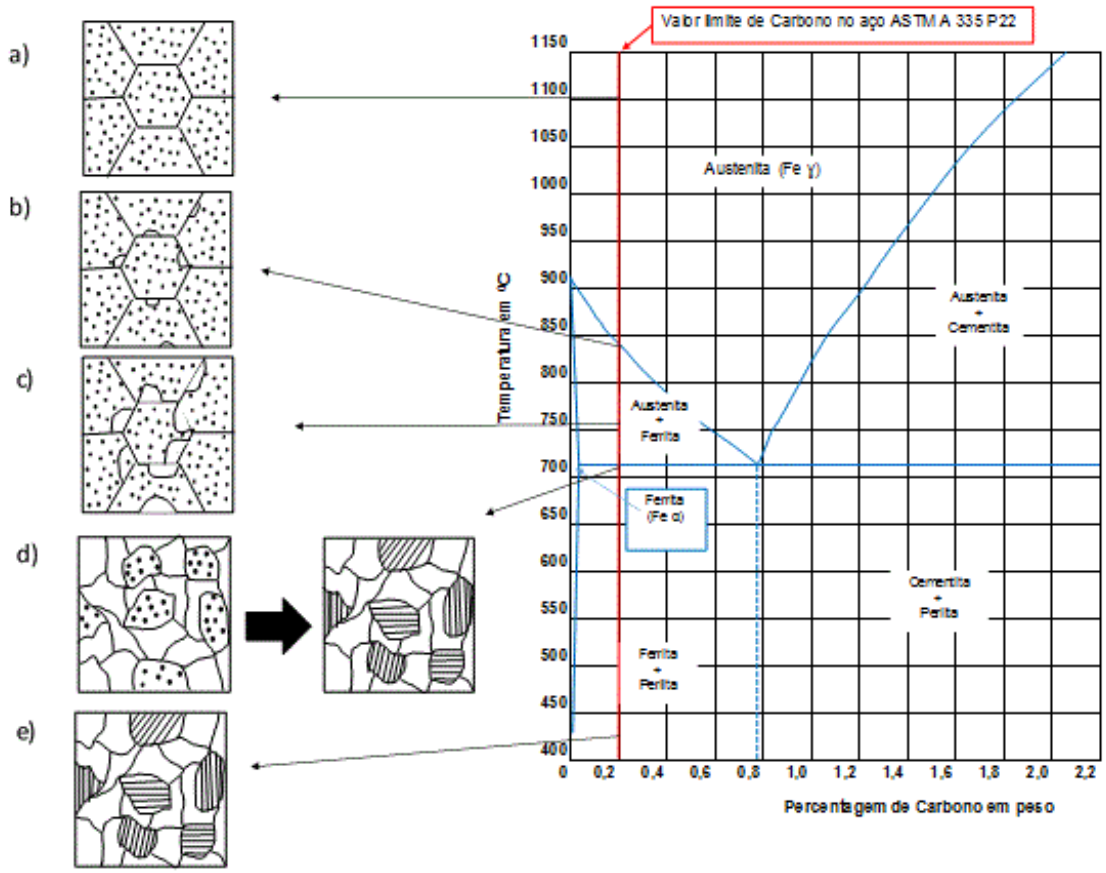


Figura 2.1 – Diagrama de fase Ferro/Cementita, mostrando as microestruturas de um aço com 0,2% de carbono, resfriado lentamente (recozimento) após austenitização.
Fonte: Adaptada (ASHBY; et al., 1999) e (AGGEN, C.; AKSTENS, F. W.; ALLEN, C.M.; et al., 1993).

O diagrama de fases da Figura 2.1, representa a microestrutura formada quando o material for resfriado lentamente a partir da austenitização. Para resfriamentos mais rápidos a austenita se transforma em bainita ou martensita que não estão representadas nesse diagrama. A bainita consiste de um agregado não lamelar de grãos de ferrita alongados, na forma de placas ou ripas de ferrita com carbonetos precipitados dentro ou nos contornos dos grãos da ferrita, em geral esses carbonetos estão na forma de pequenos bastões ou placas finas (BRAMFITT, 2004). Por ser muito fina, essa estrutura não tem boa definição no microscópio ótico, sua visualização só é boa com o uso de microscópio eletrônico de varredura - SEM (BRANCO, 2007).

Os constituintes que se formam no resfriamento de um aço são melhor compreendidos com a utilização do diagrama TTT, onde estão presentes as três variáveis que interferem na formação deles. Essas variáveis, que dão nome ao

diagrama, são: temperatura, tempo e transformação. O diagrama TTT é obtido com velocidades de resfriamento diferentes a partir da austenitização até uma temperatura especificada na qual o aço é mantido até que seja completada a transformação de toda a austenita, seguido de um resfriamento rápido (Figura 2.2). Esse diagrama é utilizado para a definição do tratamento térmico necessário para se ter uma microestrutura desejada (CHIAVERINI, 1971).

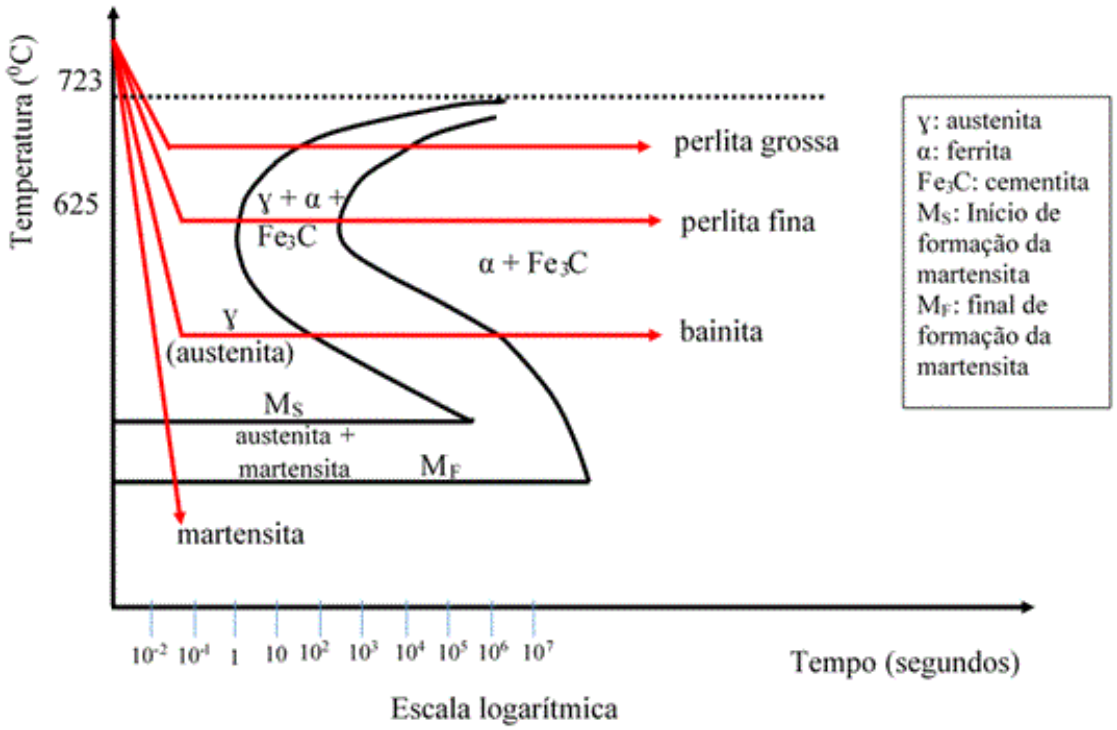


Figura 2.2 – Esquema simplificado do diagrama TTT de um aço eutetóide.
Fonte: Adaptada de (MEYRICK, 2002).

A perlita é um constituinte comum nos aços carbono e baixa liga, quando esses são resfriados lentamente a partir da austenitização. A Figura 2.3 mostra a microestrutura da perlita obtida de um aço baixa liga, com 2,25Cr-1Mo, recozido e atacado com solução de nital 2%. Os grãos claros são ferrita e os escuros, perlita. Com o aumento usado não é possível identificar a estrutura lamelar da perlita (RIGUEIRA; et al., 2011).

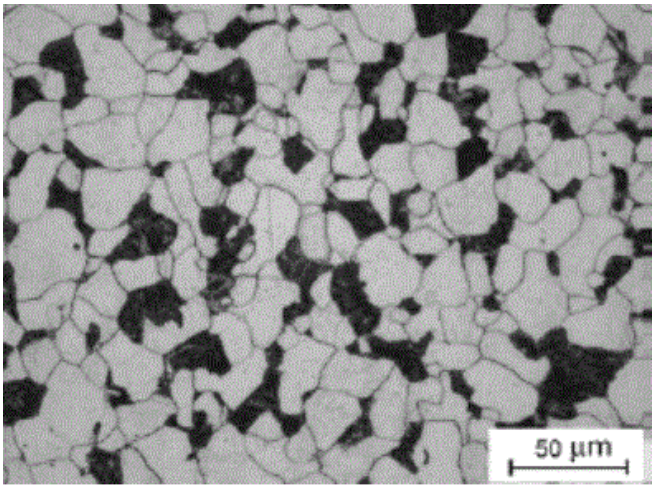


Figura 2.3 – Microestrutura de um aço com 2,25Cr1Mo recozido, mostrando grãos de perlita (áreas escuras) e ferrita (área branca). Ataque com 2 % nital.
Fonte: (RIGUEIRA; et al., 2011).

A Figura 2.4 mostra uma micrografia óptica do aço com 2,25Cr-1Mo na condição normalizado e revenido, condição padrão de fornecimento desse material, onde pode ser observada uma microestrutura com grãos de ferrita (áreas claras) e bainita (áreas escuras). A bainita melhora a resistência a fluência desses materiais (RIGUEIRA; et al., 2011).

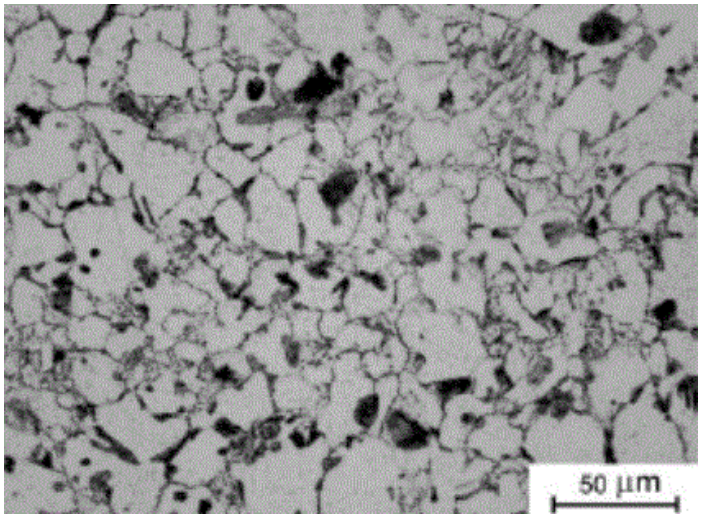


Figura 2.4 – Microestrutura de um aço 2,25Cr1Mo na condição normalizado e revenido. Ataque com 2% nital.
Fonte: (RIGUEIRA; et al., 2011).

A martensita é formada após aquecimento acima da temperatura A3, para os aços hipoeutetóides, e A1 para os demais, seguido de um resfriamento rápido, geralmente em água, óleo ou salmoura. A martensita é constituída por ferrita supersaturada em carbono o que a torna um constituinte muito duro e frágil. Essa microestrutura para ser útil precisa ser revenida. A Figura 2.5 mostra um exemplo da

martensita encontrada nos aços de baixa liga.

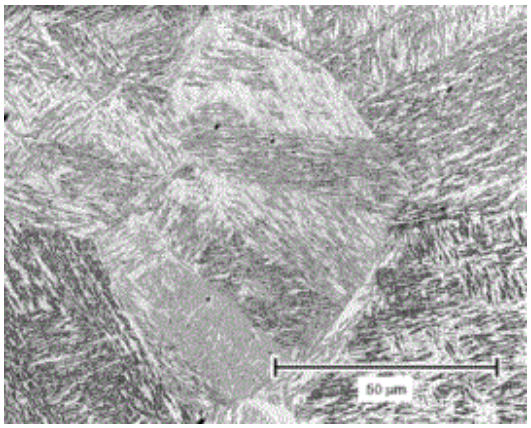


Figura 2.5 – Microestrutura de um aço baixa liga resfriado em água, mostrando a martensita. Ataque com 2% nital e aumento de 500X.
Fonte: (BRAMFITT, 2004).

O revenido é um tratamento diferenciado dos demais, porque o aquecimento será sempre em uma temperatura abaixo da austenitização. O objetivo do revenido é eliminar a maioria dos inconvenientes da martensita, além de aliviar as tensões internas e aumentar a sua tenacidade. A temperatura do revenido depende das propriedades mecânicas desejadas da martensita. A Figura 2.6 mostra o efeito da temperatura de revenido sobre a tenacidade e a dureza da martensita revenida.

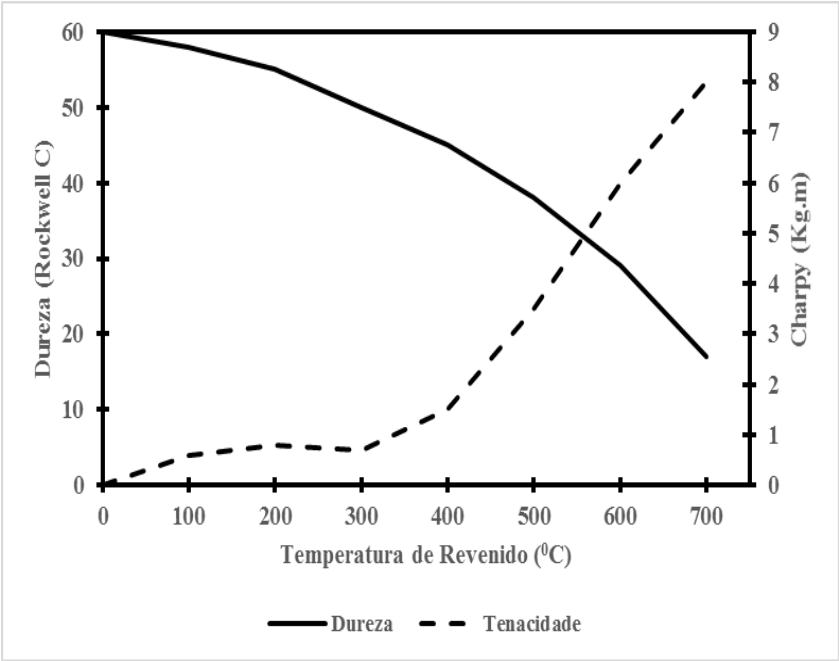


Figura 2.6 – Efeito da temperatura de revenido na dureza e tenacidade de um aço carbono com 0,45%C temperado.
Fonte: adaptada de (CHIAVERINI, 1971).

Essas duas propriedades são as mais importantes na recuperação de uma junta soldada. A dureza é uma avaliação simplificada da tensão residual da solda e a tenacidade a capacidade da solda em evitar a propagação de descontinuidades do tipo trinca.

No caso de soldas em vaso construídos com aços baixa liga 2,25Cr-1Mo, o código ASME seção VIII divisão 1 adota o valor de 677^0C, com o objetivo de reduzir a dureza e melhorar a tenacidade ao máximo, além de promover alívio de tensão da junta soldada (ASME VIII, tab. UCS-56, 2013).

O revenido realizado acima de 600^0C provoca a reversão do reticulado instável da martensita temperada ao reticulado estável cúbico, transforma qualquer austenita retida, precipita a formação de carbonetos e seu crescimento na forma globular. Esses carbonetos aparecem distribuídos de forma aleatória na matriz ferrítica, formando uma martensita revenida com carbonetos dispersos (CHIAVERINI, 1971). A Figura 2.7 mostra a martensita revenida de um aço baixa liga.

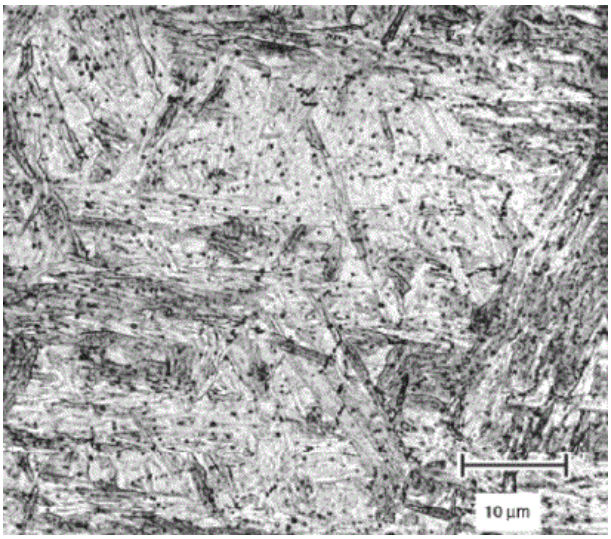


Figura 2.7 – Microestrutura de um aço baixa liga, resfriado em água e revenido a 650^0C. Martensita revenida e carbonetos esferoidizados. Ataque com 4% picral + 2% nital. Aumento de 1000X.
Fonte: (BRAMFITT, 2004).

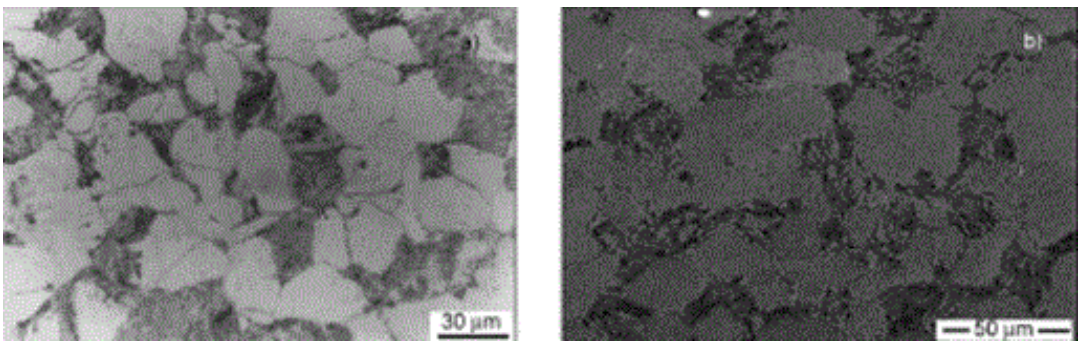
A tabela 2.1 mostra os constituintes das soluções de nital e picral referidas, nas figuras 2.3 a 2.7 (ASTM E407, 1999).

Tabela 2.1 – Constituintes das soluções de nital e picral.

Nome	Ingredientes	Aplicações
2 % nital	2 ml de ácido nítrico concentrado + 100 ml de álcool etílico (95%).	Ataque usual para aços carbono e baixa liga. Revela contorno de grão da ferrita e constituintes.
4 % picral	4 g de ácido pícrico + 100 ml de álcool etílico (95%).	Usada para revelar estruturas de ferrita e carbonetos.

Fonte: (ASTM E407, 1999).

O cromo adicionado ao aço tem o objetivo de aumentar a resistência à corrosão em meios oxidantes, melhora a resistência à fluência e a resistência a erosão, devido a formação de carbonetos de cromo, já o molibdênio é adicionado ao aço, junto com o cromo, com o objetivo de potencializar a melhora na resistência a fluência e a corrosão por pitting nos aços inoxidáveis, através do aumento das características protetoras da camada passivante, formada em meios oxidantes (AGGEN, C.; AKSTENS, F. W.; ALLEN, C.M.; et al., 1993). Esses dois elementos de liga adicionados ao aço carbono, formam os aços liga mais usados na indústria mundial, na construção de vasos de pressão segundo o código ASME seção VIII *(American Society of Mechanical Engineers),* (ASME VIII, tab. UCS-56, 2013). A Figura 2.8a mostra a microestrutura de um aço com 2,25Cr-1Mo, obtida com microscópio ótico. Na Figura 2.8b, com o uso do microscópio eletrônico de varredura (SEM) e maior aumento, foram identificados os constituintes da microestrutura como uma distribuição uniforme de carbonetos alongados (partes escuras) em uma matrix de ferrita - fundo claro (JHA; et al., 2010).



a) Microscópio óptico b) Microscópio eletrônico de varredura (SEM)

Figura 2.8 – Microestrutura de um aço com 2,25Cr-1Mo.
Fonte: (JHA; et al., 2010).

2.2 PASSE DE REVENIMENTO (*TEMPER BEAD*)

O processo de soldagem é essencial na construção de equipamentos que serão submetidos à pressão, tais como: caldeiras, vasos de pressão, tubulações, etc. Além disso, é responsável por uma grande parte do custo de fabricação e muitas vezes trazem muito mais problemas do que se espera.

A soldagem consiste na transferência de metal na fase líquida através de uma fonte de calor em movimento. Esse processo provoca transformações metalúrgicas e tensões térmicas no metal base. Após completada a deposição, o metal depositado pode conter descontinuidades devido à rápida velocidade de resfriamento, bem como, microestruturas indesejáveis no metal depositado e na parte do metal base aquecido pelo calor da soldagem, chamada de zona termicamente afetada pelo calor (ZTA). A Figura 2.9 representa esquematicamente a descrição acima.

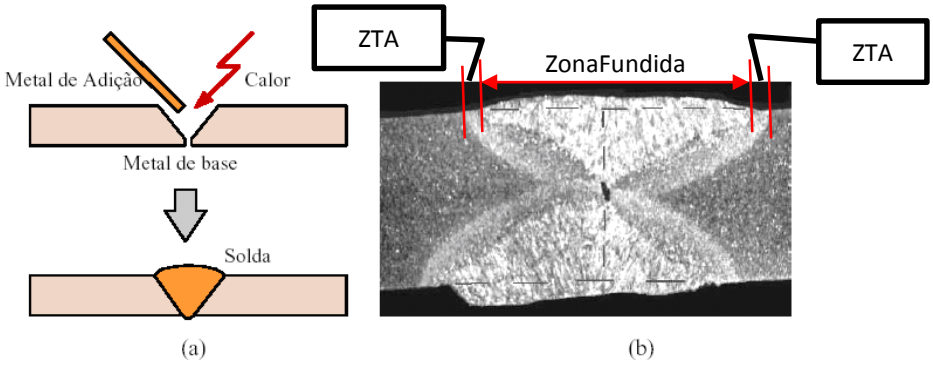


Figura 2.9 – Localização da zona fundida e ZTA de uma solda.
Fonte: adaptada de (OLIVEIRA, 2012).

O processo de soldagem deve ser especificado de maneira a minimizar a ocorrência de descontinuidades e de microestruturas indesejáveis, isto é feito através do controle das três principais variáveis do processo: a energia introduzida durante a soldagem (*heat imput*), velocidade de resfriamento após a deposição e o nível das tensões residuais após a soldagem.

Outra variável importante, a ser definida no processo de soldagem, é a composição química do depósito, pois a segregação de elementos de liga a formação de eutéticos diferentes durante a solidificação podem favorecer a nucleação de trincas a quente e reduzir significativamente a tenacidade.

O método mais indicado para definir as variáveis de um processo de soldagem tem como ponto de partida a definição da composição química da poça fundida e as

propriedades mecânicas desejáveis da união soldada. A propriedade mecânica de uma junta soldada depende diretamente da microestrutura obtida após a soldagem. O uso do digrama de fases ferro-cementita associado a curva de resfriamento da solda é uma das principais ferramentas empregadas para prever as características da microestrutura final da união soldada, como mostrado na Figura 2.10 para um aço carbono com 0,15%C, teor máximo de carbono do material em estudo. A união soldada pode ser dividida em três regiões distintas, em função da temperatura atingida pelo metal, como descrito a seguir:

a) Zona Fundida: parte da união constituída pela poça de fusão, com a presença de elementos químicos oriundos do consumível e do metal base. Após a solidificação, na maioria dos casos, é possível observar nessa parte do metal uma estrutura bruta de fusão (colunar);
b) Zona de Transição: parte dela participa da poça de fusão e parte não. Após a solidificação não se observa mais a estrutura colunar e o metal segue a granulação do metal base;
c) Zona Termicamente Afetada pelo Calor (ZTA): é constituída pela parte do metal atingida pelo calor da solda, mas que não participou da poça de fusão. Como trata-se de uma faixa larga de temperatura, costuma ser subdividida em quatro subseções, assim constituídas:
    c.1) Zona de crescimento de grão: parte do metal que atingiu a temperatura mais alta, sem participação na poça de fusão. Após a solidificação, a região terá uma granulação maior que a do metal base;
    c.2) Zona de recristalização: similar a anterior, mas com tamanho de grão menor, está mais próxima do metal base;
    c.3) Zona intercrítica ou de transformação parcial: parte do metal antes da linha AC1 (723ºC), onde a austenita se transforma em ferrita, sua granulação é similar ao metal base, parte mais próxima do metal base onde ocorre austenitização;
    c.4) Zona subcrítica ou revenida: região abaixo da linha AC1, onde não ocorre a formação da austenita, mas apenas um revenimento do material. Após a solidificação o metal terá apenas um revenimento da sua estrutura original.

A temperatura que o metal atingiu, o tempo de permanência nessa temperatura e a velocidade de resfriamento vão definir o tamanho de cada uma das zonas descritas acima, bem como os constituintes finais da microestrutura na temperatura

ambiente.

O diagrama TTT é válido para os casos de resfriamentos isotérmicos, onde existe tempo suficiente para a difusão dos átomos e formação dos constituintes mais estáveis, entretanto, no caso de soldas, o resfriamento é continuo e o diagrama precisa ser corrigido. Contudo, empregando as mesmas técnicas usadas para a obtenção do diagrama de resfriamento isotérmico (TTT), é possível obter-se um diagrama similar para resfriamento contínuo. Esse novo diagrama é chamado de diagrama CCT, essa sigla está associada ao nome em inglês, *continuous, cooling and transformation*, cuja tradução é curva de resfriamento continuo.

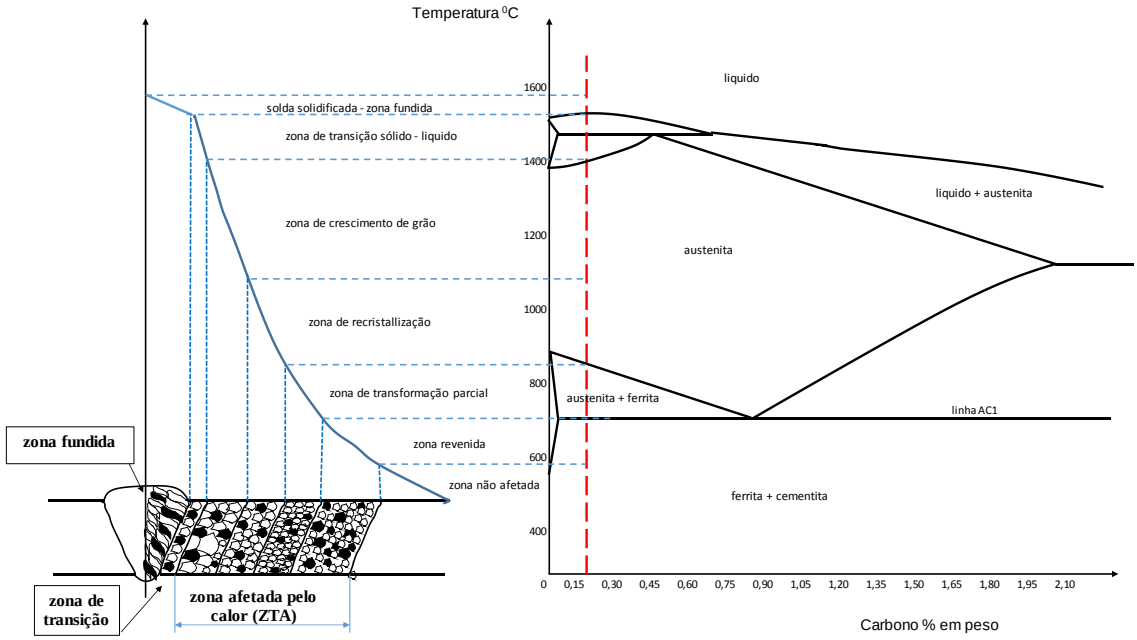


Figura 2.10 – Formação das zonas fundida, transição e zta de uma solda.
Fonte: adaptada de (VISHNU, 1993).

Se for realizada a sobreposição dos diagramas TTT e CCT para um mesmo aço verifica-se que as curvas com resfriamento contínuo sempre estão deslocadas mais para a direita e para baixo, como mostrado na Figura 2.11, onde o diagrama TTT foi construído usando linhas cheias e o diagrama CCT com linhas tracejadas, onde as curvas mais à esquerda são o início de transformação e as curvas mais a direita o fim da transformação. Foram simuladas 4 velocidades de resfriamento diferentes mostrando os constituintes formados em cada velocidade, deve ser verificado os traços azuis que correspondem as faixas onde ocorrem as transformações durante o resfriamento contínuo (ALIYA, 2004).

Devido ao pequeno volume da zona de transição a microestrutura de uma união soldada costuma ser definida pelas informações obtidas através da análise metalográfica das zonas fundida e ZTA com o uso do diagrama CCT da liga (VISHNU, 1993).

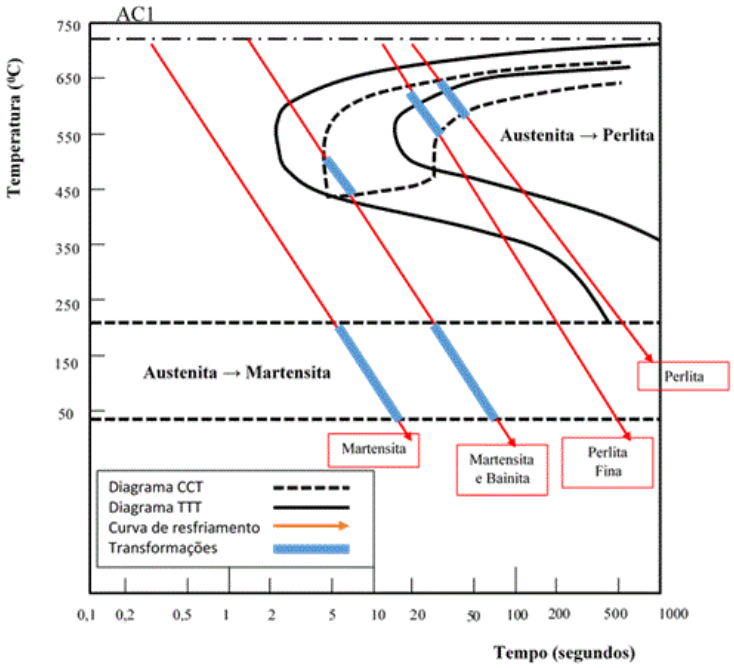


Figura 2.11 – Constituintes formados com taxas de resfriamento diferentes.
Fonte: adaptada de (ALIYA, 2004).

A Figura 2.12 é o diagrama CCT para o aço ASTM-A335gr. P22, usado nesse trabalho. Pode ser observado que existe um distanciamento das curvas de formação da ferrita/perlita e bainita/martensita. Isso mostra que, nesses aços, a obtenção de perlita só é conseguida com um resfriamento muito lento (recozimento) e mesmo assim a estrutura poderá estar acompanhada de bainita e ou martensita. Para velocidades de resfriamento maior a microestrutura será de bainita e ou martensita. Experiências desenvolvidas por Tripathy, mostraram que essa é uma característica dos aços baixa liga cromo e molibdênio, porque esses elementos retardam a transformação da perlita e favorecem a formação de bainita no resfriamento da austenita, o que provoca um endurecimento do metal (TRIPATHY, 2011).

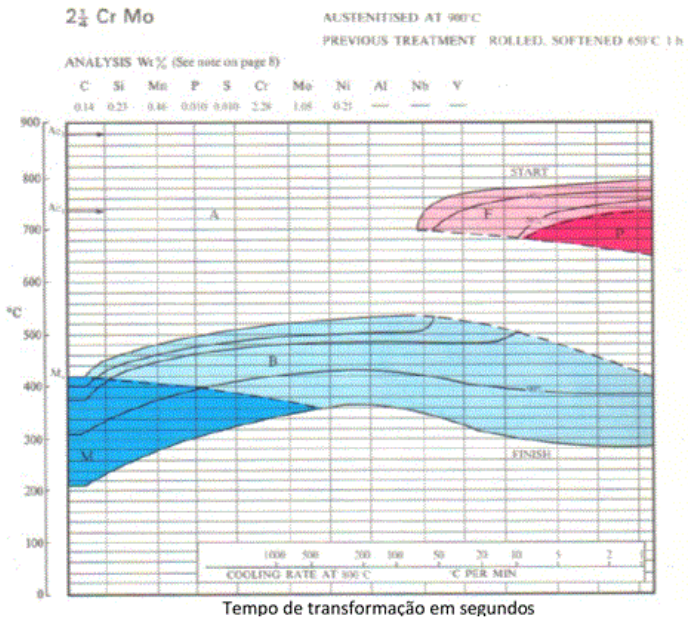


Figura 2.12 – Diagrama CCT do aço baixa liga 2,25Cr-1Mo (ASTM-A-335 gr. P22). Fonte: (DAWSON, 2012).

Para facilitar a discução sobre a interferência da solda no metal base a Figura 2.10, pode ser redesenhada como mostrado na Figura 2.13, onde as diferentes sub zonas que formam a zona térmicamente afetada pelo calor (ZTA), são representadas por cores. Assim, a ZTA é formada por uma zona de granulação grosseira (azul); seguida de uma faixa recristalizada com granulação fina (amarela); uma zona de coexistencia da ferrita e austenita, chamada de intercritica, porque inicia-se a transformação da austenita (vermelha); por fim, uma zona pós transformação da austenita, chamada de sub crítica ou revenida (verde).

Figura 2.13 – Regiões formadas durante a soldagem. Fonte: adaptação de (SPERKO, 2005).

Como já descrito, o aquecimento de um metal seguido de resfriamento rápido provoca uma modificação da microestrutura da junta soldada, sendo a ZTA a parte mais impactada, além do acrescimo da zona fundida. A Figura 2.12 mostra que os

aços baixa liga, com 2,25Cr-1Mo, levam a ZTA da solda para uma microestrutura com bainita e martensita, com consequente redução das propriedades mecânicas do material, bem como a capacidade de defesa do metal a propagação de descontinuidades do tipo trinca, pela redução da tenacidade. Os códigos de projeto de caldeiras, vasos de pressão e tubulações, como o código ASME, reconhecem esse problema e estabelecem o tratamento témico após a soldagem como a metodologia mais barata e mais indicada para mitigar o problema. Esse tratamento é relizado numa temperatura de 677^0C de maneira a promover um revenido na martensita, além disso, essa metodologia provoca um alívio das tensões residuais de soldagem, melhorando mais ainda à resistência a propagação de trincas (ASME VIII, tab. UCS 56, 2013).

O código ASME de caldeiras e vasos de pressão define o passe de revenimento usado em soldas como, um cordão de solda aplicado sobre um metal já depositado com a finalidade de melhorar a microestrutura e as propriedades mecânicas da zona térmicamente afetada pelo calor da deposição anterior ao passe de revenimento. Assim, um procedimento de soldagem com passe de revenimento tem a mesma finalidade do tratamento térmico após a soldagem, ou seja, promover uma melhora na microestrutura da ZTA através do revenimento da microestrutura formada, usando a energia de soldagem como fonte de calor.

Sperko e outros autores, tem definição similar para o passe de revenimento, “passe de revenimento é a deposição de um cordão de solda, sobre um local específico de um primeiro cordão de solda, de maneira que o calor introduzido por deposição provoque um revenido da ZTA do primeiro cordão de solda”. Como mostrado na Figura 2.14, a ZTA do primeiro cordão de solda é revenida pelo segundo cordão, ou seja a energia do passe de revenimento deve transformar as regiões de crescimento de grão (faixa azul da figura 2.13) e de recristalização (faixa amarela da figura 2.13) em zonas revenidas (faixa verde da figura 2.13). Não tem grande influência se ficar parte da zona intercrítica (faixa vermelha da figura 2.13). Assim, uma solda revenida deve ter sua ZTA formada apenas por zonas revenidas (faixa verde), como mostrado na figura 2.14. Um pouco de faixa vermelha não tem grande influência. Na figura 2.14 as faixas azul e amarelas são do passe de revenimento.

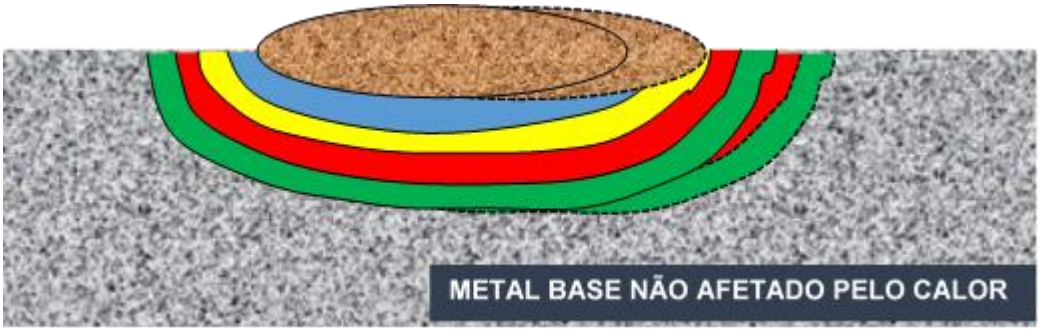


Figura 2.14 – Revenimento da ZTA com o passe de revenimento. Passe de revenimento (linhas cheias), solda revenida (linhas tracejadas).
Fonte: (SPERKO, 2005).

O efeito do passe de revenimento (segundo cordão depositado) mostrado na Figura 2.14, costuma ser conseguido quando o soldador inicia a soldagem no pé do primeiro cordão depositado e trabalha com uma energia de soldagem controlada em, aproximadamente, o dobro da energia do primeiro do cordão depositado, assim obtem-se um revenimento quase completo do metal depositado (JONES, 1987).

2.3 RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO BAIXA LIGA

Todos os metais tendem a deterioração quando expostos a um meio que contenha íons (eletrólito). A velocidade da corrosão depende da microestrutura e da composição química do metal e das características do meio, como: pH, concentração iônica, tipos de íons presentes, aeração, velocidade do fluxo e temperatura. Em meios ácidos a velocidade da corrosão aumenta com a redução do pH, já em meios não ácidos, o oxigênio é o principal agente na velocidade das reações (MEHTA; et al., 2010).

Experiências realizadas por Sun Ah Park e outros, mostrou que em meios ácidos fortes, como o ácido sulfúrico, a presença do cromo tende a formação de uma película protetora sobre a superfície do aço (passivação), contendo Cr_2O_3 ou $Cr(OH)_3$ e que essa película não se forma, quando o cobre está presente na composição química do metal (PARK; et al., 2013).

Os aços baixa liga com 2,25Cr-1Mo, foram desenvolvidos em 1960 para aplicação em plantas de geração de energia, para a fabricação dos tubos de paredes de água, superaquecedores e partes de grandes espessuras em caldeiras, bem como, para tubulações e vasos de pressão que operem com água ou vapor, devido suas boas propriedades mecânicas a alta temperatura, aliada a boa resistência a

corrosão em meios aquosos (HU, 2012).

A resistência à corrosão das ligas ferro, cromo e molibdênio depende principalmente do teor de cromo. A afinidade do cromo com o oxigênio é que determina a formação de uma película aderente, insolúvel e protetora sobre a superfície do metal e isola o metal do meio, originando sua proteção. Trata-se de um fenomeno espontâneo denominado de passivação. Nas ligas de cromo em meio oxidante essa película tem uma espessura entre 1,0 a 2,0 nm, dependendo do teor de cromo, e reduz a taxa de corrosão. A estrutura do filme protetor é similar ao óxido de cromo (Cr_2O_3). A passivação adquiri maior estabilidade quando a quantidade de cromo no aço for superior a 11% em peso, formando os aços inoxidáveis (CUNAT, 2004).

À adição de molibdênio, nos aços ferríticos (cromo e molibdênio), aumenta a resistência a corrosão localizada (*pitting*). Nos aços inoxidáveis a resistência corrosão por *pitting* pode ser avaliada pelo indice de resistência a formação de *pitting* (*PRE – Pitting Resistance Equivalent*). Para os aços inoxidáveis ferríticos a fórmula empregada está mostrada na equação (2.1). Quanto maior o índice PRE maior será a resistência a formação de pitting. A fórmula não é utilizada para aços com menos do que 11% de cromo (CUNAT, 2004).

$$PRE = \%\ Cr + 3{,}3.\ (\%\ Mo) – (\%\ em\ peso) \qquad (2.1)$$

Sendo %Cr: teor de cromo na liga;
%Mo: teor de molibdênio na liga.

2.4 INFLUÊNCIA DA SOLDA NA CORROSÃO

O que se deseja de uma união soldada é continuidade das propriedades mecânicas e da resistência à corrosão do metal base. As soldas estão sujeitas às mesmas formas de corrosão que os metais, mas, são mais susceptíveis a corrosão provocada por pilha galvânica, *pitting*, corrosão intergranular, trincas associadas ao hidrogênio e corrosão sob tensão. A corrosão intergranular está associada à formação de precipitados indesejáveis. As trincas devido ao hidrogênio e a corrosão sob tensão, dependem da presença de tensões residuais associadas a meios

específicos. Já a formação de *pitting* e par galvânico, são as formas mais comuns, pois podem estar presentes em qualquer solda, dependendo da composição química e microestrutura do depósito (ACKERMAN, H.;ADOLPHON, D. R.; AGARWAL, D. C.; et al., 1992).

A corrosão por *pitting* e galvânica costumam ser minimizadas com uma escolha adequada do consumível a ser aplicado, este deve conter elementos de liga que garantam um depósito com composição química similar ao metal base e evitem a precipitação de fases indesejáveis, bem como a nucleação de defeitos relacionados a solidificação da solda (DAVIS, 2006).

Davis e outros autores consideram bastante difícil identificar porque em alguns casos a corrosão é mais acentuada nas soldas, por causa do grande número de fatores que podem provocar essa maior corrosão (DAVIS, 2006).

Os principais fatores que interferem na resistência à corrosão de uma solda podem ser separados em três grupos como segue (DAVIS, 2006):

a) Fatores relacionados ao projeto, como: tipo de junta, grau de restrição e penetração da solda;
b) Fatores relativos a deposição, como: processo de soldagem, sequência e método de deposição, proteção e contaminação da poça de fusão;
c) Fatores metalúrgicos, como: precipitação de fases secundárias, micro segregações, recristalização, crescimento de grão e perda de elementos de liga por volatilização.

A influência dos dois primeiros grupos é minimizada com a utilização de procedimentos de soldagem qualificados e respeito aos requisitos das normas de projeto, como o código ASME, API ou outros, tendo como critério de qualificação o atendimento as propriedades mecânicas do metal base.

Já os fatores metalúrgicos merecem uma atenção maior, pois mesmo utilizando os requisitos de projeto e procedimentos qualificados, podem ocorrer a formação de microestruturas e durezas diferentes da esperada devido a variações na energia de soldagem e nas temperaturas interpasses, que nem sempre são especificadas no procedimento de soldagem ou controladas durante a soldagem. Pequenas variações nessas duas variáveis podem levar a microestruturas e durezas diferentes das desejadas e promover a formação de par galvânico ou maior tendência a formação de *pitting*.

Experiências conduzidas por Sami, Eman e Mahdi mostraram que chapas em aço carbono, com 0,14% de carbono, submetidas a tratamentos térmicos diferentes e expostas numa solução à 3,5% de NaCl apresentaram taxas de corrosão uniforme diferentes. A microestrutura com ferrita/perlita grosseira apresentou taxas de corrosão uniforme maior que as microestruturas de ferrita/perlita fina e maior que a martensita revenida (Figura 2.15) (SAMI; et al., 2013).

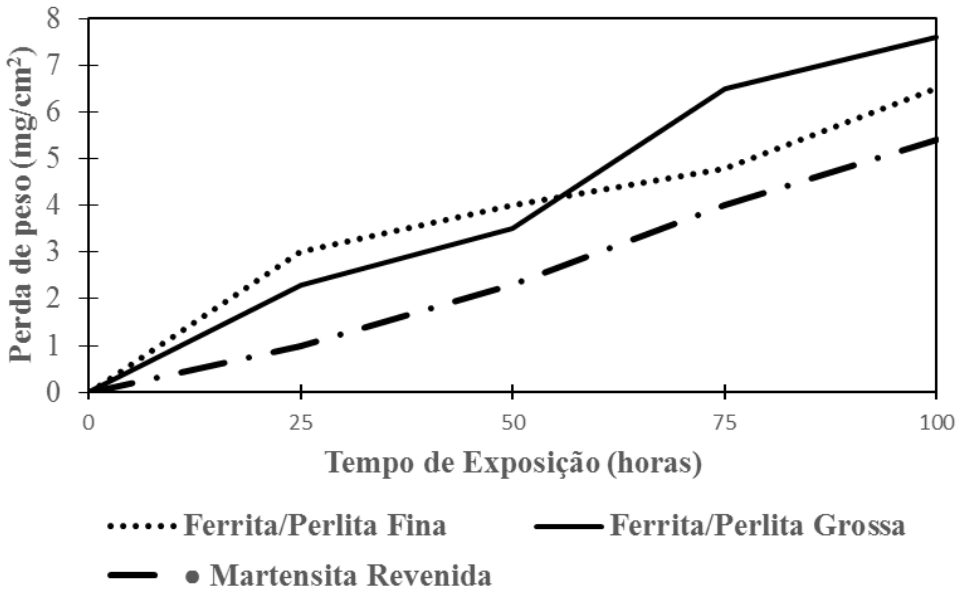


Figura 2.15 – Taxas de corrosão das microestruturas de um aço carbono imerso em solução aquosa com 3,5% NaCl.
Fonte: Adaptada de (SAMI; et al., 2013).

Microestruturas contendo perlita apresentam maior taxa de corrosão do que a martensita. Este comportamento é atribuído ao fato da ferrita, contida na perlita, ter menor quantidade de carbono do que cementita o que gera a formação de um par galvânico, onde a cementita atua como cátodo. Algumas experiências mostram que a taxa de corrosão do aço diminui com o aumento da fração volumétrica de ferrita, devido à redução na relação entre as áreas catódica e anódica. Este fato é mais pronunciado quando se tem um alinhamento de ferrita/perlita ou ferrita/perlita grosseira. Nos aços com cromo e molibdênio o efeito da microestrutura na corrosão é menor (SAMI; et al., 2013).

Outro fator que pode interferir na resistência à corrosão, mesmo em soldas com procedimentos qualificados é a tensão residual que está relacionada com o ciclo de temperatura, velocidade de resfriamento e, consequentemente, com a microestrutura da solda.

Entende-se como tensão residual aquela que permanece no material após a retirada da fonte geradora, como ocorre nos processos de soldagem. Soldas não tratadas, possuem tensões residuais de tração na superfície que podem interferir na resistência à corrosão, porque favorecem a formação da corrosão localizada. Em alguns meios, os *pitting* formados, associados as tensões residuais, podem levar a nucleação de trincas, num tipo de corrosão chamado de corrosão sobre tensão *(stress corrosion cracking – SCC)* (CONTRERAS; et al., 2015).

Contreras, Hernandez, Galvan e Vega, mediram tensões residuais entre 59 e 94% do limite de escoamento do metal base, em soldas homogêneas realizadas em chapas de aço carbono, com 0,09% de carbono. Essas soldas expostas em soluções com pH de 3 e 10, mostraram um favorecimento de corrosão localizada nas soldas (CONTRERAS; et al., 2015).

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Larson (2008) defini a estatística como, o ramo da ciência em que se estuda como fazer, tratar e verificar a confiança de uma coleta de dados. Estatisticamente existe um conjunto de dados denominado de população, como o conjunto de todos os resultados medidos e as amostras que são um subconjunto da população. A meta de todo tratamento estatístico é saber a confiança dos resultados para usá-los nas tomadas de decisão.

O tratamento estatístico leva a uma grande quantidade de cálculos e gráficos por isso existem vários programas específicos que facilitam essa atividade, dentre eles o Minitab é um dos mais utilizados pela sua similaridade com o aplicativo Excel (LARSON, 2008).

A tendência central de uma população ou amostra é determinada através da média, mediana e moda, valores determinados como mostrado a seguir (LARSON, 2008):

a) Média: a média é relação entre a soma de todas as medidas realizadas sobre o número de medidas. Caso as medidas tenham pesos diferentes, calcula-se uma média ponderada. Nesse caso é calculada a soma do produto das medidas pelo seu peso sobre a soma do peso de cada medida.

b) Mediana: colocando-se todas as medidas em ordem crescente a medida central é a mediana, no caso de número pares de medidas, calcula-se a média das duas medidas centrais.

c) Moda: moda é a medida que se repete por mais vezes em uma amostra, caso nenhuma medida se repita a moda é zero.

O gráfico mais utilizado para caracterizar uma população ou amostra é a distribuição de frequência. Esse gráfico mostra as frequências no eixo da ordenada e os valores medidos no eixo da abcissa. A partir do gráfico de frequência calcula-se a amplitude, variância e desvio padrão de uma população ou amostra (LARSON, 2008).

A amplitude é a diferença entre o maior e o menor valor das medidas, enquanto que o desvio é a diferença entre a medida e a média, equação (2.2). A variância é a média dos quadrados dos desvios, equação (2.3) (LARSON, 2008).

$$\text{Desvio de } x = x - \mu \tag{2.2}$$

$$\text{Variância} = \frac{\Sigma\,(x-\mu)^2}{N} \tag{2.3}$$

Sendo x: valor medido.

μ: média dos valores medidos.

N: número de medidas.

O desvio padrão é a medida de quanto uma medida se desvia da média, calculado através da equação (2.4) (LARSON, 2008).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma\,(x-\mu)^2}{N}} \tag{2.4}$$

Sendo σ: desvio padrão.

Demais termos iguais a equação (2.3).

A distribuição contínua de probabilidade de uma medida mais importante em estatística é a distribuição normal. Essa distribuição tem as seguintes características:

- A média, a mediana e a moda são iguais.
- A curva normal é simétrica em relação à média.
- A área total sob a curva é igual a 1.

Conhecendo a média e o desvio padrão pode-se estabelecer o intervalo de confiança de uma medida. O nível de confiança “c” é a probabilidade de que uma medida esteja dentro do intervalo definido na Figura 2.16. Usualmente é utilizado um nível de confiança entre 90% e 99% (LARSON, 2008).

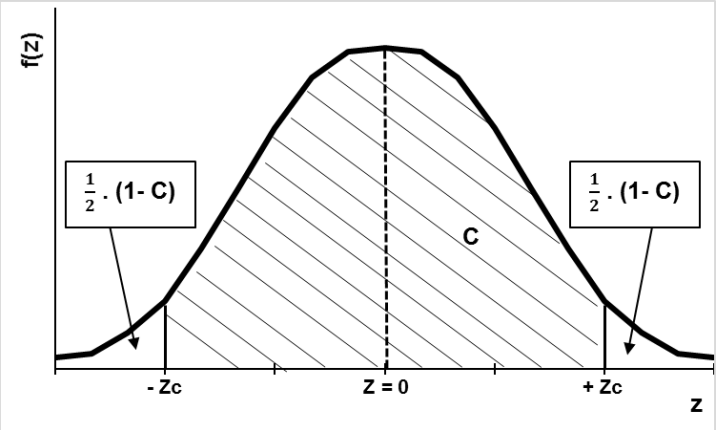


Figura 2.16 – Nível de confiança de uma amostra com distribuição normal.
Fonte: Adaptada de LARSON (2008).

Com amostras pequenas, menor do que 30 medidas, se a distribuição das medidas for aproximadamente normal, a distribuição da média será uma distribuição t. Uma distribuição t difere da distribuição normal por formarem um curva mais achatada do que a distribuição normal, como mostrado na Figura 2.17. Na abcissa aparece o valor de t, calculado como mostrado na equação (2.5). A distribuição t é uma família de curvas determinadas pelo grau de liberdade (g.l). O grau de liberdade é a quantidade de medidas menos 1 (LARSON, 2008).

$$t = \frac{\dot{x} - \mu}{s} \cdot \sqrt{n} \qquad (2.5)$$

Sendo ẋ: média da amostra

μ: média

s: desvio padrão amostral

n: número de amostras

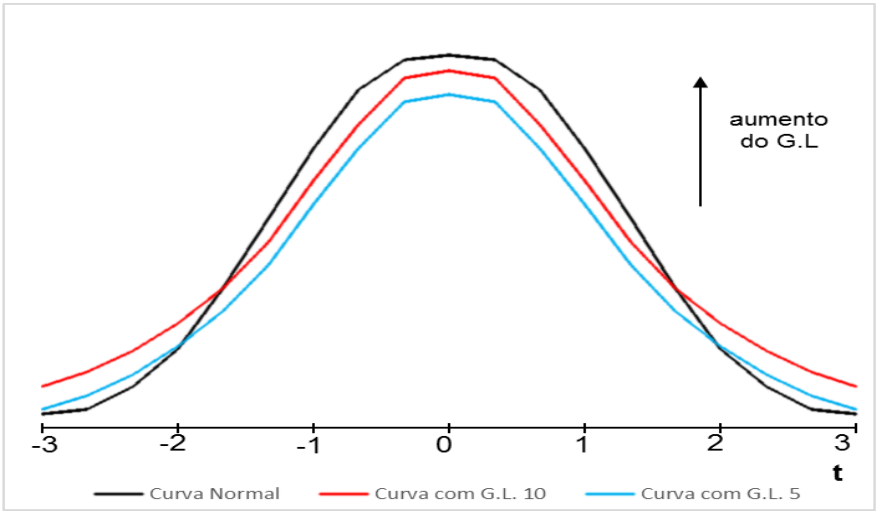


Figura 2.17 – Influência do grau de liberdade na distribuição t.
Fonte: Adaptada de LARSON (2008).

Quando se deseja fazer uma comparação entre as médias de uma amostra, com distribuição t é comum a utilização do teste de Tukey. O teste de Tukey é considerado rigoroso e de fácil aplicação e tem como base a amplitude total estudentizada (OLIVEIRA, 2008).

No teste de Tukey duas médias são consideradas estatisticamente diferentes sempre que o valor absoluto da diferença entre elas for igual ou maior que a Diferença Mínima Significativa (DMS) calculada pela equação (2.6) (OLIVEIRA, 2008).

$$DMS = q \cdot \sqrt{\frac{QMRes}{r}} \qquad (2.6)$$

Sendo DMS: Diferença Mínima Significativa.

q: amplitude total estudentizada (valor tabelado por Tukey considerando o nível de significância).

QMRes: Quadrado Médio do Resíduo (erro).

R: número de repetições.

Para se realizar o teste deve ser estabelecido um nível de significância (α) que normalmente é de 1% ou 5% (α = 0,01 ou 0,05).

Pode ser estabelecido também o intervalo de confiança das médias comparadas. Neste caso, se o zero estiver contido no intervalo de confiança calculado não há diferença significante entre as médias comparadas, dentro do nível de confiança adotado (HINES, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O material e métodos utilizados no desenvolvimento do presente estudo estão relacionados a seguir, com o objetivo de permitir a repetibilidade dos testes realizados.

3.1 MATERIAIS APLICADOS

O material usado para realizar as experiências foi um tubo, sem costura, com diâmetro nominal de 150 mm (6 polegadas) e espessura de 21,95 mm *(schedule* XXS – 0,864 polegadas), cortado em meia cana, fabricado dentro das dimensões padrões do código ASME (ASME B 36.10, 2004). (Figura 3.1).

a) b) c) d)

Figura 3.1 – Tubo em meio cana, onde foram realizadas as soldas do corpo de prova. 3) ***solda sem tratamento; b) solda tratada; c) solda com passe de revenimento; d) metal base.***

A composição química, propriedades mecânicas e o processo de fabricação do tubo adquirido para confecção dos corpos de prova seguiram os requisitos da especificação ASTM A 335 gr. P22. A composição química retirada da Norma ASTM está detalhada na tabela 3.1. e foi confirmada na oficina, antes da soldagem, através do analisador de ligas por XRF (fluorescência de raios x), modelo Niton XL3t. O material foi fornecido normalizado e revenido a 675^0C, conforme especificação.

Tabela 3.1. Composição química retirada da especificação ASTM A 335 gr.P22 – UNS K21590.

Elemento Químico	Carbono	Manganes	Fósforo	Enxofre	Silicio	Cromo	Molibdênio
% em peso	0,05 0,15	0,30 0,60	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,50	1,90 2,60	0,87 1,13

Fonte: (ASTM A 335, 2011).

3.2 PREPARAÇÃO DAS SOLDAS

Foi preparado o mesmo tipo de junta para as três soldas. A escolha foi direcionada para um tipo de junta, com penetração total, que não interferice no resultado do teste de corrosividade e menor volume de metal depositado. Com esse foco e considerando a espessura do material foi escolhida a junta do tipo meio “V” para penetração total (Figura 3.2). As dimensões da junta foram estabelecidas com base na norma *American Welding Society* (AWS D1.1, 2010).

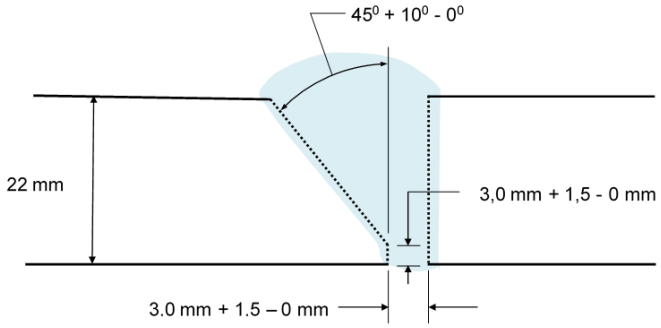


Figura 3.2 – Esquema da junta soldada usada em todas as soldas.
Fonte: Adaptada da Figura. 3.4 – pág. 99 (AWS D1.1, 2010).

O procedimento de soldagem seguiu os requisitos de qualificação de procedimento do código ASME seção IX. A escolha do consumível e temperatura interpasses, seguiram as tabelas A.1 e 4 da norma API 582, respectivamente (API 582, 2009).

O tratamento térmico realizado em uma das soldas, após completada a solda, seguiu os requisitos da tabela 331.1.1 da norma ASME B.31.3 (ASME B31.3, 2002).

Na solda onde foi depositado o passe de revenimento, as bordas foram amanteigadas, com material homogênio ao metal base. Nos passes seguintes ao amanteigamento foi utilizada uma energia de soldagem mais elevada, com o objetivo de revenir a ultima camada do amanteigamento, simulando em toda a extensão do “chanfro” o passe de revenimento.

As soldas foram todas realizadas com consumíveis da mesma especificação e da mesma corrida, armazenados e mantidos dentro dos requisitos do fabricante. O processo de deposição foi o mesmo adotado para todos os corpos de prova, sendo a raiz feita com o processo TIG e o enchimento, incluso o passe de revenimento, com o processo de eletrodo revestido.

A tabela 3.2, mostra a especificação e composição química dos consumíveis adquiridos para a execução das três soldas.

Tabela 3.2 – Especificação e composição química dos consumíveis adquiridos.

Especificação dos Consumíveis - ASME II Parte C									
Camada	Especificação ASME	Consumível	Composição Química (% em massa)						
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
RAÍZ	SFA - 5.28	ER-90S-B3	0,07 - 0,12	0,40 - 0,70	0,40 - 0,70	0,025	0,025	2,30 - 2,70	0,90 - 1,20	0,20
Enchimento	SFA - 5.5	E-9018-B3	0,05 - 0,12	0,90	0,80	0,03	0,03	2,00 - 2,50	0,90 - 1,20	-
Amanteigamento	SFA - 5.5	E-9018-B3	0,05 - 0,12	0,90	0,80	0,03	0,03	2,00 - 2,50	0,90 - 1,20	-
Passe de Revenimento	SFA - 5.5	E-9018-B3	0,05 - 0,12	0,90	0,80	0,03	0,03	2,00 - 2,50	0,90 - 1,20	-

Fonte: (ASME II parte C, 2010).

Após completada todas as soldas foram cortados 3 espécimes para teste de corrosividade em cada solda e três do metal base, como mostra o traçado de corte na Figura 3.3.

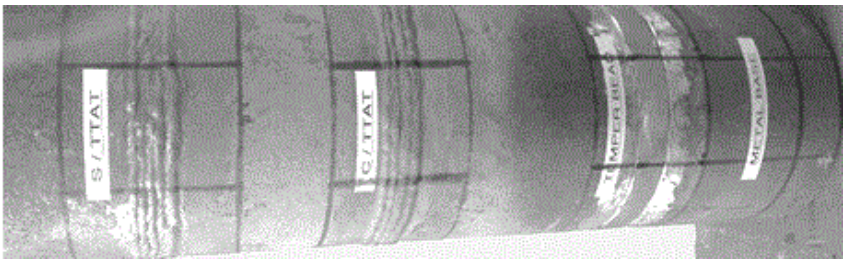


Figura 3.3 – Marcação para o corte do espécimes para o teste de corrosividade, são três espécimes de cada solda e mais três do metal base.

Após a separação do corpo de prova nos espécimes para o teste de corrosividade e antes de iniciar os testes foi realizada análise da composição química do metal base e do depósito das três soldas. A análise foi executada no laboratório da SGS LABMAT – Laboratório de Análises e Ensaios de Materiais LTDA, com a técnica do espectômetro de emissão ótica, seguindo os requisitos do código ASTM – A 751.

3.3 ANÁLISES METALOGRÁFICAS

As amostras para os ensaios de macrografia, micrografia e dureza foram preparadas através de lixamento manual, usando lixas de carbeto de silício (SiC), nas granulometrias de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 e polidas em disco rotativo, com pasta de alumina de 1μm. O ataque químico realizado por imersão, de 40 a 60 segundos, com solução de nital 5% (solução de 5 ml de ácido nítrico concentrado + 100 ml de álcool etílico, 95%), conforme ASTM E 407 (1999).

Os exames de macrografia foram realizados com aumento de 10 vezes, utilizando estereoscópio da Leica, modelo S8AP0 e as imagens obtidas através de uma câmara acoplada, da mesma marca, modelo MC120HD, com captação de imagem pelo sistema CCD (*charge coupled device*).

Os exames de metalografia foram realizados com microscópio ótico da marca Leica, modelo DMILMLED e as imagens obtidas através de uma câmara acoplada ao microscópio, da mesma marca, modelo EC3, com captação de imagem pelo sistema CCD (*charge coupled device*).

Foram armazenadas 31 imagens metalograficas de maneira a identificar as microestruturas do metal base, zona fundida, zona termicamente afetada e a zona de transição metal base/ZTA/zona fundida, com diferentes aumentos, como descrito na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Características das metalografias preparadas.

Material	Quantidade de Imagens	Espécime	Localização	Aumentos (x)
Metal base	4	Metal sem solda	seção transversal do material	100, 200, 500 e 1000
Solda	4			100, 200, 500 e 1000
Transição solda/ZTA	1	Metal soldado	seção transversal do material	100
ZTA	4			100, 200, 500 e 1000
Solda	4			100, 200, 500 e 1000
Transição solda/ZTA	1	Metal soldado e Tratado térmicamente	seção transversal do material	100
ZTA	4			100, 200, 500 e 1000
Solda	4			100, 200, 500 e 1000
Transição solda/ZTA	1	Metal soldado com Passe de Revenimento	seção transversal do material	50
ZTA	4			100, 200, 500 e 1000

3.4 DUREZAS

A microidentificação de dureza é o método mais indicado quando se precisa determinar a dureza de microconstituintes ou no caso de soldas, quando se deseja verificar a dureza das zonas fundida e zta separadamente. Isto é possível, devido ao pequeno tamanho da impressão colocada no material fazendo com que a medida fique restrita à resposta de uma pequena área, individualizando os resultados. Assim, tem-se a separação entre os valores de dureza das zonas fundidas e zta da solda (VOORT, 2000).

As durezas foram determinadas através do método Vickers que utiliza

penetrador de ponta piramedal de diamante, com ângulo de 136^0 e aplicada carga de 1 Kg. A metodologia adotada na medição seguiu os requisitos da norma ASTM – E 384-11 (2011).

Foi utilizado o equipamento Micro Hardness Tester, modelo 400.310 da Digimess.

3.5 TESTE DE CORROSIVIDADE

A Figura 3.4 mostra uma dos espécimes para teste de corrosividade da solda com tratamento térmico pós soldagem, após o corte.

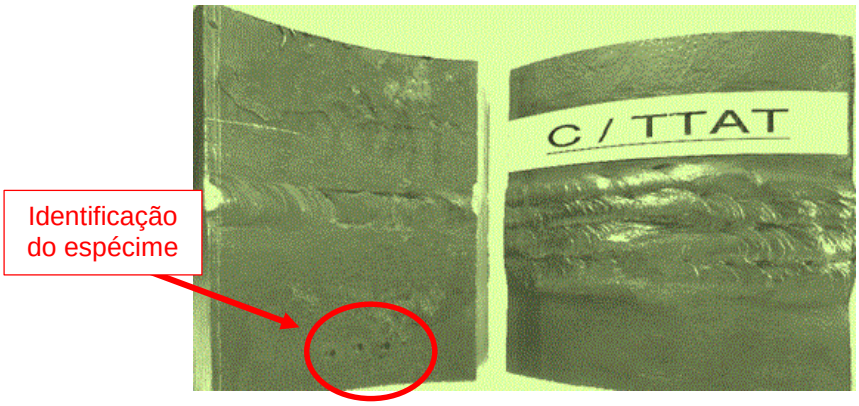


Figura 3.4 – Exemplo de uma espécime para teste de corrosividade após corte do corpo de prova – raiz da solda (esquerda); acabamento da solda (direita).

Na Figura 3.4 pode ser observado a identificação do espécime, antes da exposição ao meio. Na tabela 3.4 estão representadas as identificações adotadas para cada espécime.

Tabela 3.4 – Identificação dos espécimes para o teste de corrosividade.

Corpo de prova	Identificação das espécimes para o teste de corrosividade	Cordão de solda do acabamento	Raiz da solda
Solda sem Tratamento	● no verso	Como depositado	Totalmente removido
Solda com Tratamento	●●● no verso	Como depositado	Como depositado
Solda com passe de revenimento	●● no verso	Totalmente removido	Totalmente removido
Metal base	Sem identificação	NA	NA

A área de exposição de cada espécime para o teste de corrosividade estão descritas na tabela 3.5. O apêndice A mostra o cálculo das áreas de exposição.

Tabela 3.5. – Área da superfície de exposição dos espécimes.

Espécime	Área Exposta (cm^2)	
	Cuba com fluxo	Cuba estagnada
Sem solda	142,27	145,94
Solda sem tratamento	139,30	140,80
Solda com tratamento	146,38	144,78
Solda com passe de revenimento	147,45	137,70

Para a construção da nave onde foi realizado o teste de corrosividade com meio circulante foram vencidas as seguintes etapas:

1ª Etapa: Com base nas dimensões dos espécimes a serem testadas e considerando uma distância entre elas suficiente para garantir uma exposição de toda a área superficial de cada espécime foi definido uma cuba de teste, com 1000 mm de comprimento, 200 mm de largura e 300 mm de altura, com capacidade volumétrica máxima de 60 litros;

2ª Etapa: Definida a necessidade de uma cuba de circulação com um volume igual ao da cuba teste, para evitar extravasamento. Essa cuba foi construída com 1000 mm de comprimento, 300 mm de largura e 200 mm de altura, com capacidade volumétrica máxima de 60 litros;

3ª Etapa: Projetado um sistema de circulação que garantisse uma velocidade inferior a 2 metros por segundo para evitar a possibilidade de erosão;

4ª Etapa: Definido pela utilização do volume de 60 litros de solução para ser usado no teste, garantindo imersão total dos espécimes, sem chance de extravasamento, mesmo com uma parada repentina das bombas;

5ª Etapa: Realizados inúmeros testes de circulação até a definição final, do material e dimensões dos componentes do sistema de circulação;

6ª Etapa: Definida a adoção do método da altura piezométrica como o mais adequado para medir a velocidade de entrada da solução em cada ponto na cuba de teste;

7ª Etapa: Para reduzir o espaço a cuba de circulação foi instalada abaixo da cuba de teste;

8ª Etapa: Foi definida a concentração de 0,25 molar de ácido sulfúrico, como a solução inicial e manutenção do pH inferior a 3,0 durante todo o tempo de exposição, estabelecido em 15 dias.

A definição da manutenção do pH inferior a 3,0 foi para minimizar a ocorrência de passivação dos espécimes durante a exposição.

Após vários testes de circulação a vazão de 0,35 m^3/hora foi considerada a mais segura para as bombas usadas. Com a definição do diâmetro das tubulações de sucção e descarga chegou-se a uma velocidade de fluxo entre 0,60 e 0,70 metros/segundo em cada ponto de entrada na cuba de teste. A entrada do fluxo na cuba de teste foi feita através de tubos instalados na frente de cada espécime, instaladas a 60 mm do fundo da cuba e as saídas foram instaladas a 150 mm do fundo da cuba. Os espécimes foram colocados um na frente de cada entrada da solução, a 90 mm do bocal de entrada. Para cada entrada foi instalada uma saída na mesma direção, com a intenção de evitar fluxos preferenciais sobre os espécimes em teste. A homogeneização das velocidades de entrada foi realizada através de válvulas esferas manuais, tendo como referência a altura piezométrica obtida com a instalação de uma placa de orifício, com orifício centralizado de 8,6 mm de diâmetro, localizado antes da entrada na cuba superior. A Figura 3.5, mostra a nave construída para os testes.

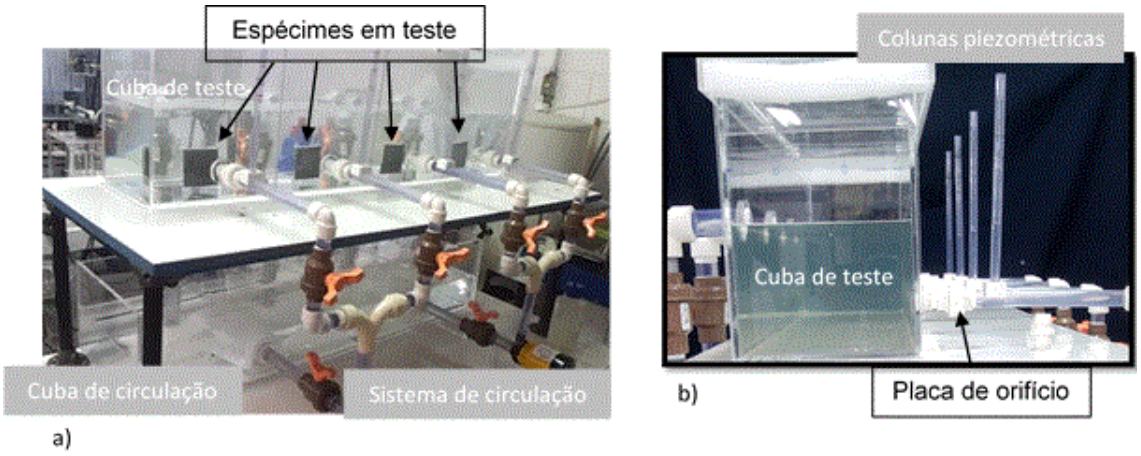


Figura 3.5 – a) Vista frontal total da nave construída para realizar o ensaio; b) vista lateral da cuba de teste (superior) com o detalhe dos tubos piezométricos para medida da velocidade.

Para o teste na condição estagnada foi utilizada uma cuba redonda com diâmetro de 241 mm e 161 mm de altura, construída em acrílico e tampada com uma chapa de acrílico (Figura 3.6).

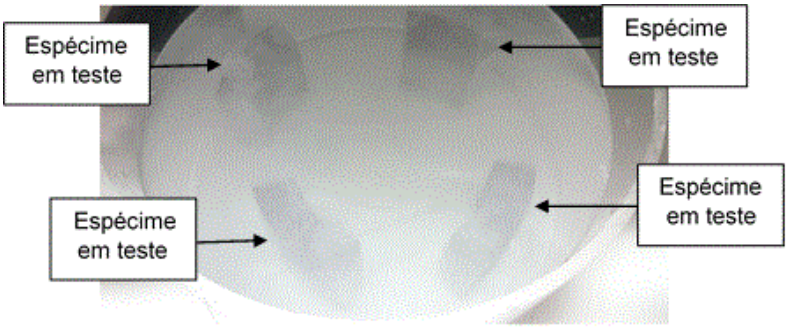


Figura 3.6 – Cuba usada para o teste na condição estagnada, no início do teste.

Antes da pesagem inicial os espécimes foram preparados através de limpeza mecânica manual, com escova de aço rotativa e limpos com acetona (Figura 3.7). A pesagem foi realizada em uma balança da marca Digimed, modelo KN4000, com precisão de 0,01 gramas.

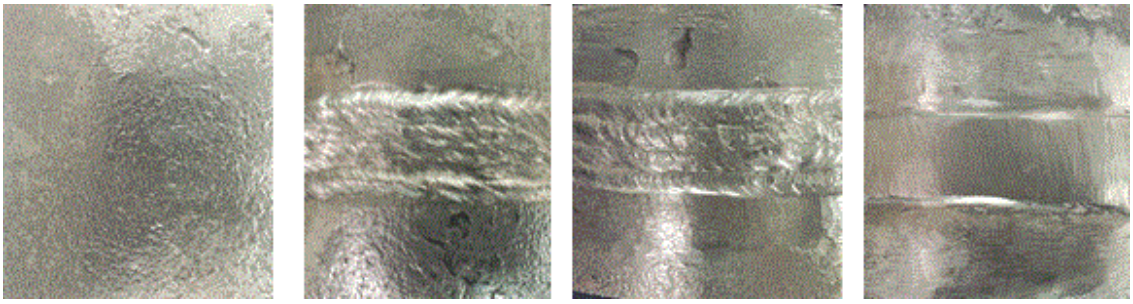


Figura 3.7 – Aspectos da superfície dos espécimes após a limpeza, antes da imersão.

Após a pesagem os espécimes foram imersos na cuba de teste. Foi definido um período de 15 dias de exposição objetivando uma corrosão acentuada, de maneira a facilitar a identificação de locais preferenciais de corrosão, se houvesse. Seguindo esse mesmo princípio, de corrosão acentuada, o pH e a temperatura da solução foram medidos diariamente, para correção do pH, caso este aumenta-se para um valor superior a 3. O pH foi medido com medidor digital da marca Instrutemp, modelo ITPH2000, aferido antes da medição e algumas vezes confirmado com um pH de bancada da marca Micronal, modelo B-474, com certificado de calibração do Inmetro válido até 20/04/2017. A temperatura foi medida utilizando um termômetro analógico, com coluna de mercúrio, da marca HG Brasil. A temperatura foi medida para se ter uma correlação com os valores de pH, pois o manual do equipamento relata influência da temperatura na medida.

Para realizar a análise estatística foi usado o aplicativo Minitab.

4 RESULTADOS

4.1 MATERIAL APLICADO

O ensaio realizado antes da utilização do material com o analisador de ligas confirmou a composição química do certificado de recebimento.

Após a separação do corpo de prova nos espécimes para o teste de corrosividade foi realizada análise química dos metais depositados nas três soldas e no metal base de uma das amostras, escolhida aleatoriamente, os resultados estão dentro dos valores especificados, como pode ser verificado nas Tabelas 4.1 e 4.2. Os depósitos de solda tiveram sua análise química comparada com a tabela QW.442, para o número A4 da norma ASME IX (ASME IX, 2013) e o material base a comparação foi com a tabela 1 da norma ASTM A 335 gr. P22 (ASTM A 335, 2011).

Tabela 4.1 – Análise química do metal base.

Local	Elemento de Liga (% em peso)						
	Carbono	Manganes	Fósforo	Enxofre	Silício	Cromo	Molibdênio
Amostra	0,116	0,42	0,014	0,005	0,21	2,17	0,93
Norma	0,05 a 0,15	0,30 a 0,60	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,50	1,90 a 2,60	0,87 a 1,13

Tabela 4.2 – Análise química do metal depositado.

Local	Elemento de Liga (% em peso)					
	Carbono	Manganês	Níquel	Silício	Cromo	Molibdênio
Solda ST	0,094	0,880	0,040	0,370	2,450	1,090
Solda CT	0,092	0,900	0,080	0,350	2,500	1,100
Solda PR	0,092	0,900	0,060	0,370	2,420	1,090
Norma	≤ 0,15	≤ 1,60	≤ 0,50	≤ 2,0	2,0 a 4,0	0,40 a 1,50

Solda ST: Solda sem tratamento térmico.

Solda CT: Solda com tratamento térmico.

Solda PR: Solda com passe de revenimento.

4.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

As principais variáveis de soldagem usadas na execução das soldas estão descritas nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. Na tabela 4.3 aparecem as variáveis da solda sem tratamento térmico após a soldagem, na tabela 4.4 as variáveis da solda com tratamento térmico após a soldagem, e na tabela 4.5 as variáveis da solda com amanteigamento nas bordas da junta e o passe de revenimento *(temper bead).*

Tabela 4.3 – Principais variáveis da Solda sem tratamento térmico após a soldagem.

CORPO DE PROVA SOLDADO SEM TRATAMENTO - DADOS DA SOLDAGEM								
Tipo de Junta: meio V - Cobre Junta: não - Posição de Soldagem (AWS): 2G, horizontal - Diâmetro do Consumível: 3,175 mm								
Camada (número)	Processo	Consumível (AWS)	Tensão (Volts)*	Corrente (Ampere)*	Velocidade de Deposição (mm/min)*	Polaridade	Energia de Soldagem (KJ/mm)*	Pré Aquecimento / Interpasses (^{0}C)
1	TIG	ER-90S B3	11,5	130,5	51	(-)	1,8	100
2	TIG	ER-90S B3	13,5	157	100	(-)	1,3	100
3	ER	E-9018 B3	23,5	130	67	(+)	2,7	120
4	ER	E-9018 B3	22,5	130	64	(+)	2,7	150
5	ER	E-9018 B3	22,5	130	71	(+)	2,5	200
6	ER	E-9018 B3	22,5	128,5	92	(+)	1,9	220
7	ER	E-9018 B3	22,5	131,5	157	(+)	1,1	240
8	ER	E-9018 B3	23,5	131,5	155	(+)	1,2	200

Energia de Soldagem do Processo TIG = 1,5 KJ/mm
Energia de Soldagem do Processo ER = 2,0 KJ/mm
***Média dos valores de cada passe.**

Temperatura de Pré Aquecimento e Interpasses no TIG = 100^{0}C
Temperatura de Pré Aquecimento e Interpasses no ER = 188^{0}C

Tabela 4.4 – Principais variáveis da solda com tratamento térmico após a soldagem.

CORPO DE PROVA SOLDADO COM TRATAMENTO - DADOS DA SOLDAGEM										
Tipo de Junta: meio V - Cobre Junta: não - Posição de Soldagem (AWS): 5G, Plana Fixa - Diâmetro do Consumível: 3,175 mm										
Camada (número)	Processo	Consumível (AWS)	Tensão (Volts)*	Corrente (Ampere)*	Velocidade de Deposição (mm/min)*	Polaridade	Energia de Soldagem (KJ/mm)*	Pré Aquecimento / Interpasses (^{0}C)	Tratamento Térmico	
									Temperatura (^{0}C)	Tempo (horas)
1	TIG	ER-90S B3	11,5	155	120	(-)	0,9	135	705	2
2	TIG	ER-90S B3	13,5	214	210	(-)	0,8	135	705	2
3	ER	E-9018 B3	24,5	113	169	(+)	1,0	160	705	2
4	ER	E-9018 B3	22,5	113	153	(+)	1,0	160	705	2
5	ER	E-9018 B3	22,5	113	192	(+)	0,8	160	705	2
6	ER	E-9018 B3	22,5	113	190	(+)	0,8	160	705	2
7	ER	E-9018 B3	22,5	131,5	223	(+)	0,8	160	705	2
8	ER	E-9018 B3	23,5	131,5	205	(+)	0,9	160	705	2

Energia de Soldagem do Processo TIG = 0,9 KJ/mm
Energia de Soldagem do Processo ER = 0,9 KJ/mm
***Média dos valores de cada passe.**

Temperatura de Pré Aquecimento e Interpasses no TIG = 135^{0}C
Temperatura de Pré Aquecimento e Interpasses no ER = 160^{0}C

Tabela 4.5 – Principais variáveis da solda com amanteigamento nas bordas da junta e passe de revenimento.

CORPO DE PROVA SOLDADO COM AMANTEIGAMENTO E PASSE DE REVENIMENTO - DADOS DA SOLDAGEM								
Tipo de Junta: meio V - Cobre Junta: não - Posição de Soldagem (AWS): 2G, horizontal - Diâmetro do Consumível: 3,175 mm								
Camada (número)	Processo	Consumível (AWS)	Tensão (Volts)*	Corrente (Ampere)*	Velocidade de Deposição (mm/min)*	Polaridade	Energia de Soldagem (KJ/mm)*	Pré Aquecimento / Interpasses (^{0}C)
CAMADAS DE AMANTEIGAMENTO DAS DUAS BORDAS DA JUNTA								
1	ER	E-9018 B3	22	109	400	(+)	0,4	150
2	ER	E-9018 B3	22	138	383	(+)	0,5	175
3	ER	E-9018 B3	23	136	405	(+)	0,5	200
ENCHIMENTO DA JUNTA APÓS AMANTEIGAMENTO DAS DUAS BORDAS								
1	TIG	ER-90S B3	12	123	90	(+)	1,0	140
2	TIG	ER-90S B3	12	143	60	(+)	1,7	140
3	ER	E-9018 B3	22	124	150	(+)	1,1	160
4	ER	E-9018 B3	22	125	160	(+)	1,0	160
5	ER	E-9018 B3	23	126	162	(+)	1,1	170
6	ER	E-9018 B3	23	125	166	(+)	1,0	180
7	ER	E-9018 B3	23	128	176	(+)	1,0	180
8	ER	E-9018 B3	23	125	220	(+)	0,8	160

Energia de soldagem do amanteigamento = 0,4 KJ/mm **Temperatura de Pré Aquecimento e Interpasses no Amanteigamento = 175^{0}C**
Energia de Soldagem do Enchimento processo TIG = 1,4 KJ/mm **Temperatura de Pré Aquecimento e Interpasses do Echimento no TIG = 140^{0}C**
Energia de Soldagem do Enchimento processo ER = 1,0 KJ/mm **Temperatura de Pré Aquecimento e Interpasses do Enchimento no ER = 168^{0}C**
*** Média dos valores de cada passe**
Nota: A camada 8 foi totalmente removida após a deposição.

O tratamento térmico foi realizado na temperatura de 705^{0}C durante 2 horas, conforme os requisitos da tabela 331.1.1 da norma ASME B.31.3 (2002).

4.3 ANÁLISES METALOGRÁFICAS

Com o objetivo de possibilitar uma análise comparativa das taxas de corrosão com as soldas foram realizadas macrografias e micrografias, como detalhado a seguir.

4.3.1 MACROGRAFIAS

Foram realizadas macrografias nas juntas soldadas, com os seguintes objetivos:

a) Avaliação do tamanho da ZTA formada em cada uma das soldas;

b) Avaliar a proporcionalidade entre as zonas fundida e ZTA;

c) Verificar a presença de inclusões na solda e ZTA.

Como descrito por Sindo Kou (2003) o tamanho e demais características da ZTA dependem da energia de soldagem (*heat imput*) e da temperatura de pré-aquecimento e interpasses. A Figura 4.1 mostra a média dos valores de energia de soldagem medidos na execução dos passes de enchimento das três soldas.

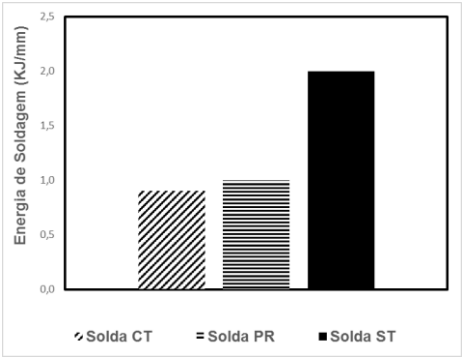
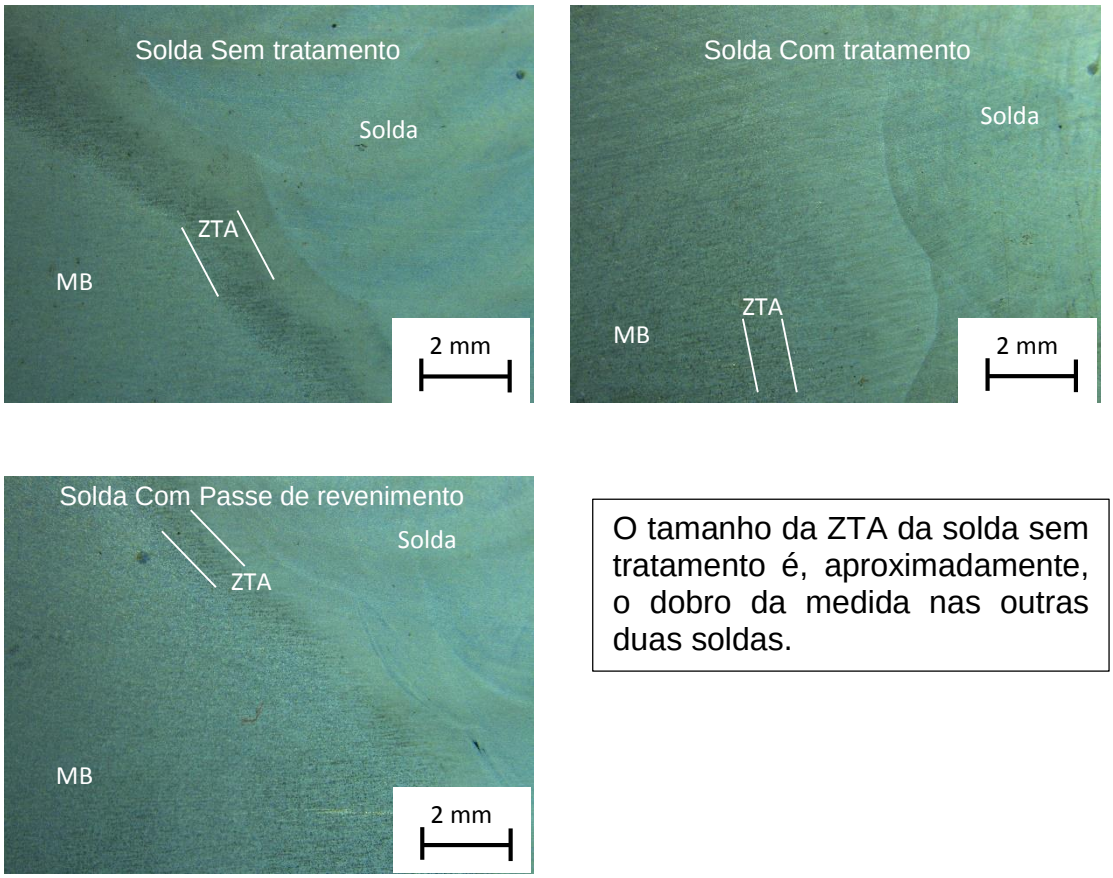


Figura 4.1 – Comparação da energia média de soldagem medida no passe de enchimento das três soldas.

A Figura 4.1 mostra que a energia de soldagem do passe de enchimento das soldas com tratamento e com passe de revenimento são 50% menor do que a solda sem tratamento, o que acarretou uma zona termicamente afetada pelo calor menor desses corpos de prova quando comparado com a solda sem tratamento, como mostrado na Figura 4.2.



O tamanho da ZTA da solda sem tratamento é, aproximadamente, o dobro da medida nas outras duas soldas.

Figura 4.2 – Tamanho da ZTA em cada solda. Macrografia com ataque de nital 5% e aumento de 10x.

4.3.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA DO METAL BASE

Como descrito por Rigueira e outros (2011) o aço 2,25Cr–1Mo pode se apresentar de duas maneiras, normalizado e revenido ou recozido. Quando recozido (por solicitação do comprador) sua estrutura terá grãos de ferrita e perlita, mas quando são fornecidos normalizado e revenido (condição padrão), apresentam uma estrutura com ferrita e bainita. A microestrutura do material usado, mostrada na Figura 4.3, revela uma estrutura com grãos de ferrita e a presença de carbonetos, a maioria não lamelares, no interior e contorno dos grãos de ferrita, caracterizando uma estrutura de bainita.

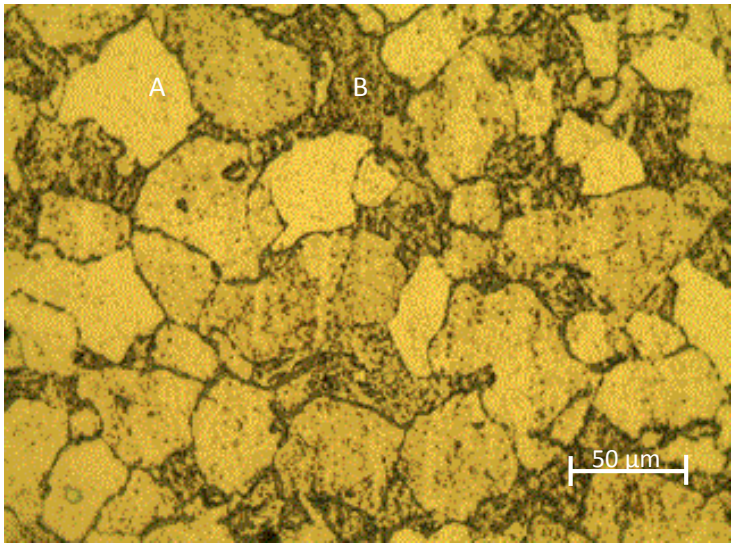


Figura 4.3 – Microestrutura do tubo onde foram preparados os corpos de prova. Observa-se grãos de ferrita (A) e carbonetos precipitados no interior dos grãos da ferrita (B). Ataque com nital 5% e aumento de 500x.

4.3.3 ANÁLISE METALOGRAFICA DA ZONA TÉRMICAMENTE AFETADA PELO CALOR (ZTA)

Os trabalhos apresentados por Rigueira e outros (2011) e por Kou (2003), chegaram a microestruturas de ZTA similares as reveladas nas micrografias realizadas, mostradas na Figura 4.4. A Figura 4.4a, refere-se a solda sem tratamento, onde observa-se uma estrutura com grãos de ferrrita alongados e ilhas de carbonetos, dando a conotação de uma estrutura bainítica. Na solda tratada, Figura 4.4b, a estrutura aparece totalmente revenida, com carbonetos esferoidizados dispersos em uma matriz de ferrita. A Figura 4.4c, solda com passe de revenimento, mostra uma estrutura parcialmente revenida, com grãos de ferrita alongados, ilhas de carbonetos e carbonetos esferoidizados, dispersos na matriz ferrítica.

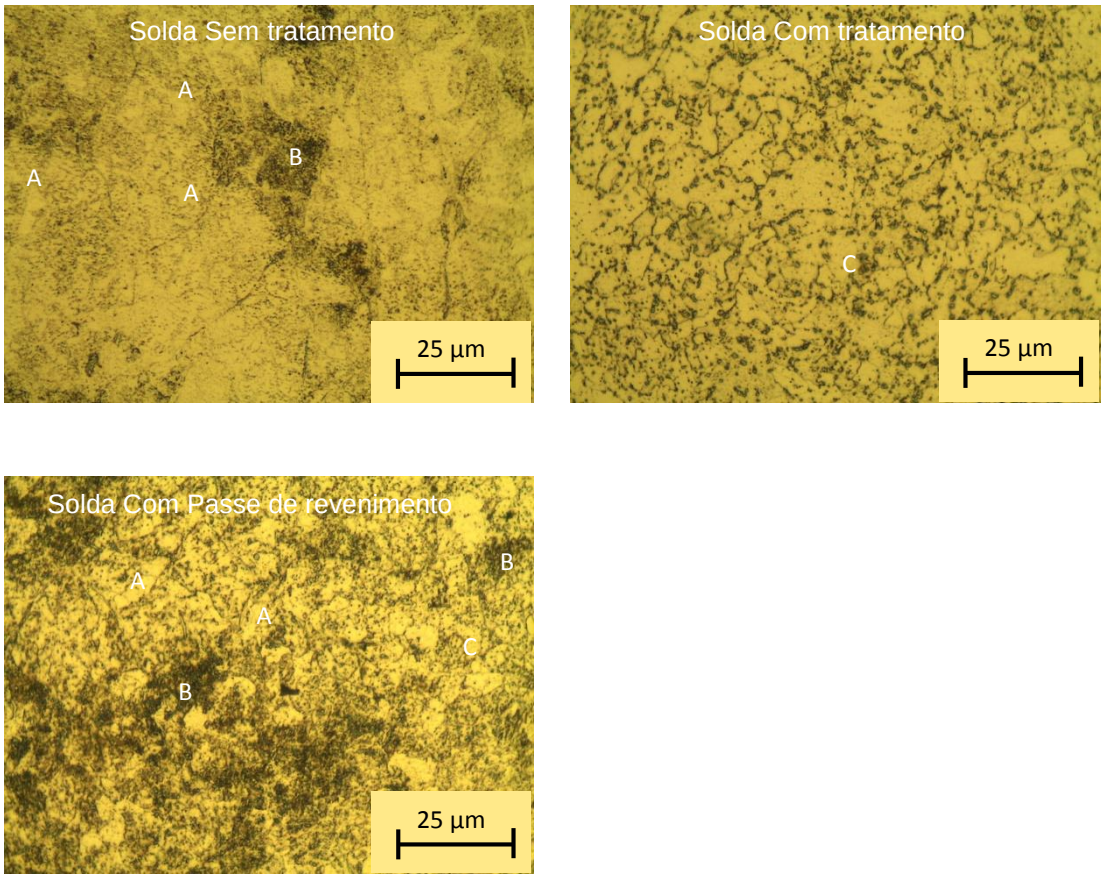
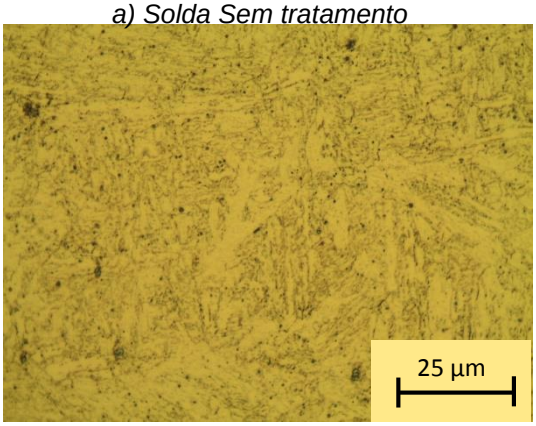


Figura 4.4 – Microestruturas da ZTA das soldas – (A) grãos de ferrita alongados; (B) ilhas de carbonetos; (C) carbonetos esferoidizados. Ataque de nital 5% e aumento de 1000x.

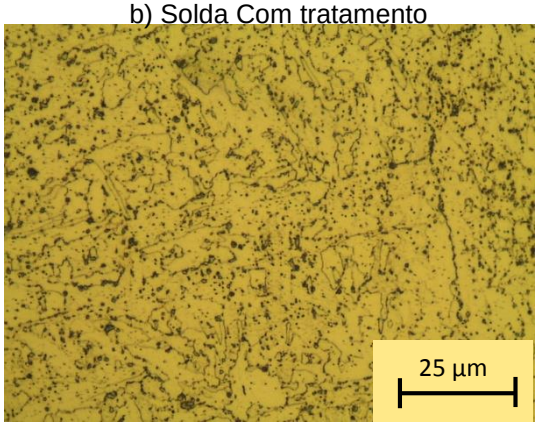
4.3.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA DO METAL DEPOSITADO

As micrografias obtidas na zona fundida das três soldas são similares as obtidas por Rigueira e outros (2011) e por Kou (2003) e estão na Figura 4.5. A solda sem tratamento, apresenta uma estrutura totalmente martensítica, grãos de ferrita na forma de placas, com carbonetos dispersos (pontos pretos), Figura 4.5a. Na solda tratada, a martensita está totalmente revenida e carbonetos dispersos (pontos pretos), Figura 4.5b. Na solda com passe de revenimento, observa-se a martensita parcialmente revenida, e a presença de alguns grãos de ferrita na forma de placas, com carbonetos dispersos (pontos pretos), Figura 4,5c.

a) Solda Sem tratamento



b) Solda Com tratamento



c) Solda Com Passe de revenimento

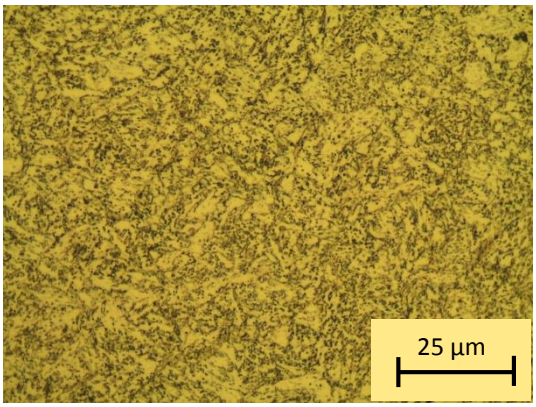
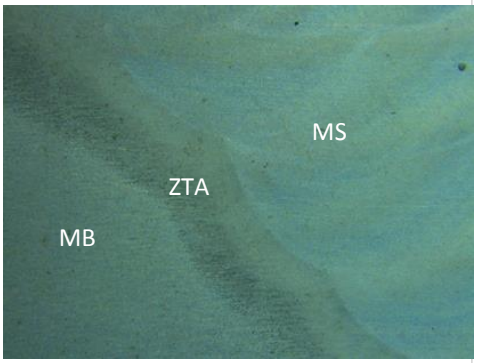


Figura 4.5 – Microestrutura do metal depositado (zona fundida) – a) martensita; b) martensita revenida; c) martensita parcialmente revenida.

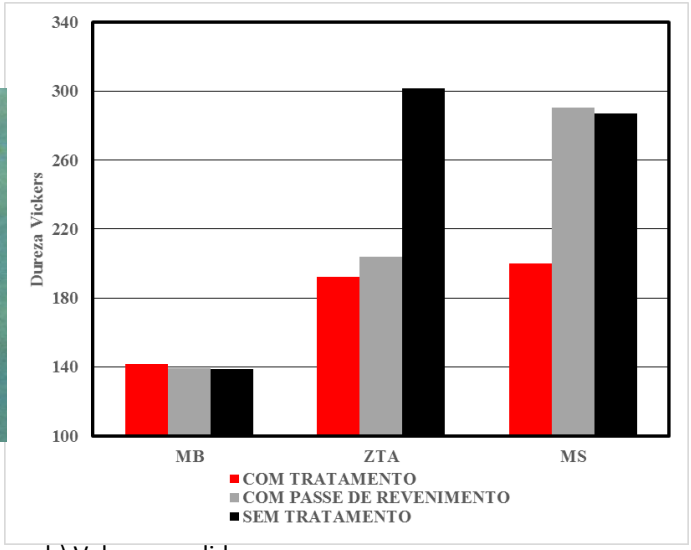
4.4 DUREZAS

Através do ensaio de microidentificação de dureza foi feita uma correlação entre a dureza e as microestruturas obtidas, dessa maneira é possível inferir a tensão residual aproximada de cada solda. As durezas foram medidas na seção transversal, das três soldas, os resultados estão na Figura 4.6.

Com objetivo de verificar o efeito do passe de revenimento na almofada e na superfície da solda foi determinada a dureza em ambos os locais, os valores estão mostrados na Figura 4.7. Tanto na zona termicamente afetada como na fundida os valores medidos na almofada foram superiores aos da superfície.



a) Locais de medida da dureza



b) Valores medidos

Figura 4.6 – Valores de dureza medidos.

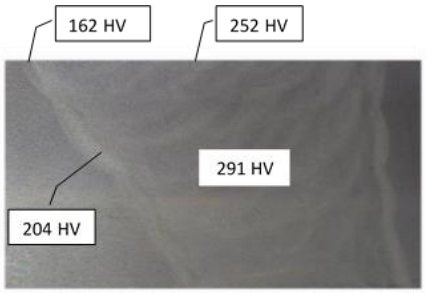
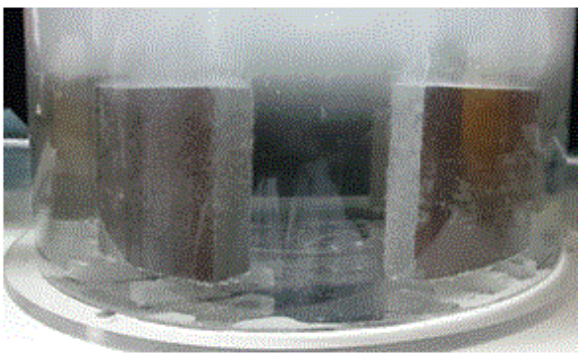


Figura 4.7 – Durezas medidas na almofada e superfície da solda com passe de revenimento.

4.5 TESTE DE CORROSIVIDADE

Logo após a imersão dos espécimes nas cubas foi possível observar uma grande evolução de bolhas junto as peças como pode ser visto na Figura 4.8.

a) Cuba com movimentação do meio



b) Cuba com meio estagnado

Figura 4.8 – Evolução do hidrogênio constatada no primeiro dia de exposição.

Após 1 dia de exposição já foi possível observar a deposição de metal no fundo das cubas, como mostra a Figura 4.9.

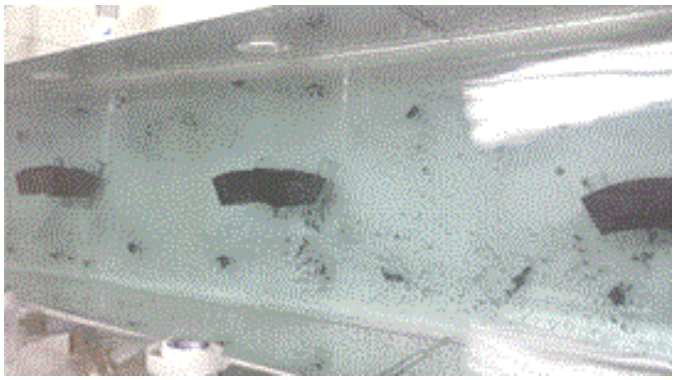
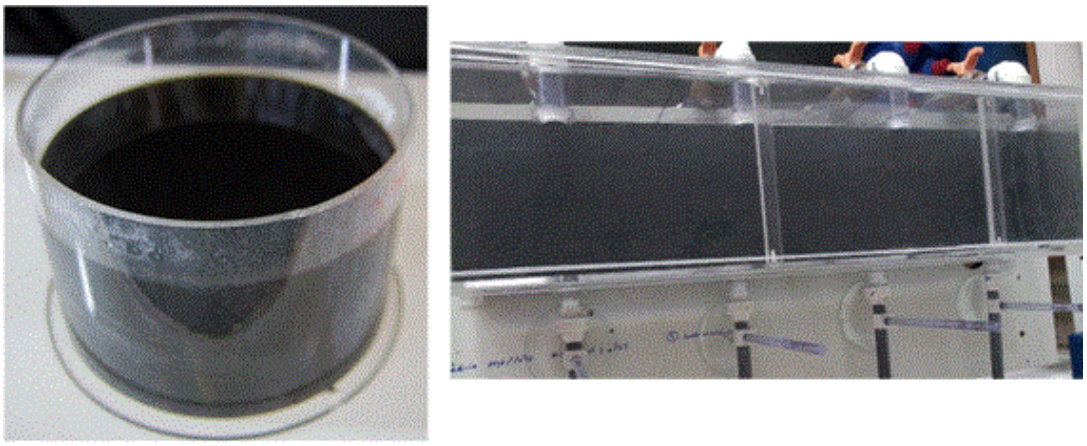


Figura 4.9 - Início da dissolução do metal, observado no primeiro dia de exposição.

Após 10 dias de exposição as cubas atingiram uma cor negra devido à grande quantidade de metal solubilizado no meio e depositado no fundo das cubas o que praticamente inviabilizava observar os espécimes (Figura 4.10), a menos que fosse realizado um jogo de luzes, como mostra a Figura 4.11.



a) Cuba com meio estagnado

a) Cuba com movimentação do meio

Figura 4.10 – Turbidez das cubas após 10 dias de exposição impossibilitando a visualização dos espécimes em teste.

Figura 4.11 – Observação de um dos espécimes em teste após 10 dias de exposição, com o auxílio de iluminação externa direta devido a turbidez do meio.

A Figura 4.12 mostra a superfície externa do tubo de todas os espécimes: antes da exposição ao meio; logo após a retirada do meio, mas antes da limpeza; após a exposição e limpeza, dos espécimes imersas no meio estático; e após a exposição e limpeza dos espécimes imersas no meio com circulação. É possível observar que em todas os espécimes a corrosão foi uniforme, sem a presença de pitting. Observa-se também um desgaste maior nos espécimes expostos ao meio circulante do que no meio estático.

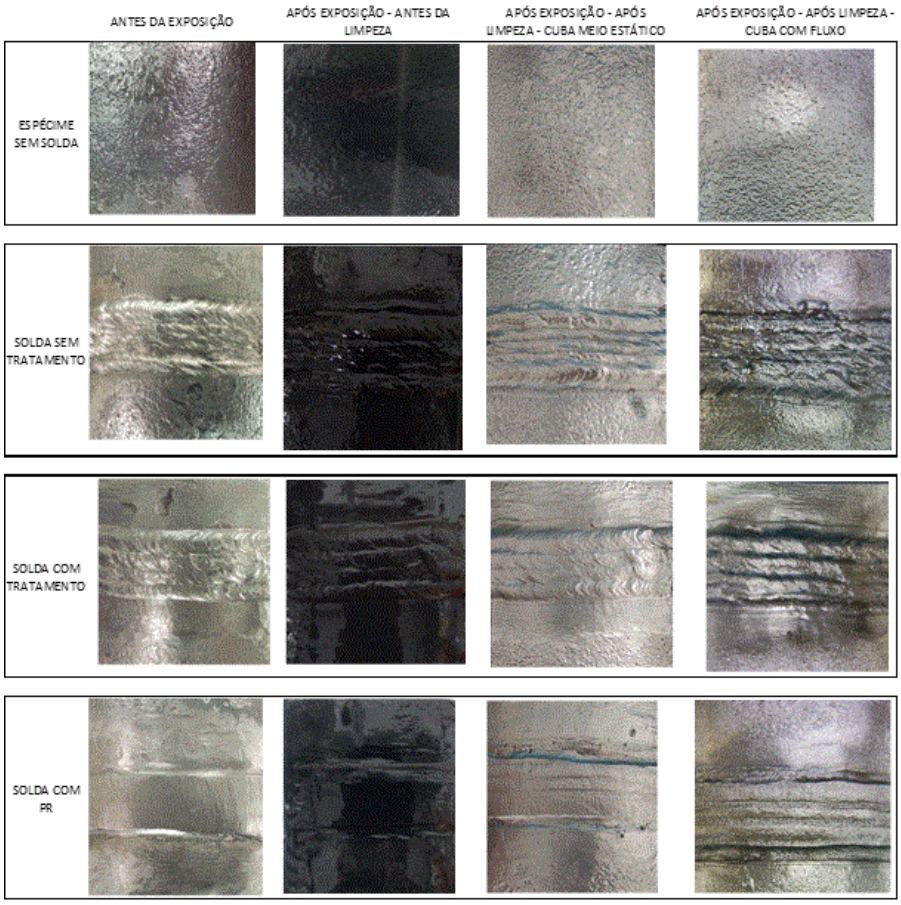


Figura 4.12 – Todas as amostras antes e após a exposição ao meio.

4.5.1 TESTES NA CUBA COM O MEIO EM CIRCULAÇÃO

Durante os 15 dias de teste foram acompanhados o pH e a temperatura da solução. A Figura 4.13 mostra o comportamento das medições realizadas. Na cuba com o meio em movimento, o pH teve uma taxa média de crescimento de 0,0022 por hora, desconsiderando as medidas realizadas com temperatura acima de 23^0C, porque as medidas de pH com temperaturas acima de 23^0C tiveram grande influência da temperatura, como descrito no manual do equipamento utilizado. O aumento da temperatura ocorreu nas medidas registradas nos dias sem movimento no laboratório, como: finais de semana e feriados, quando o ar condicionado foi desligado.

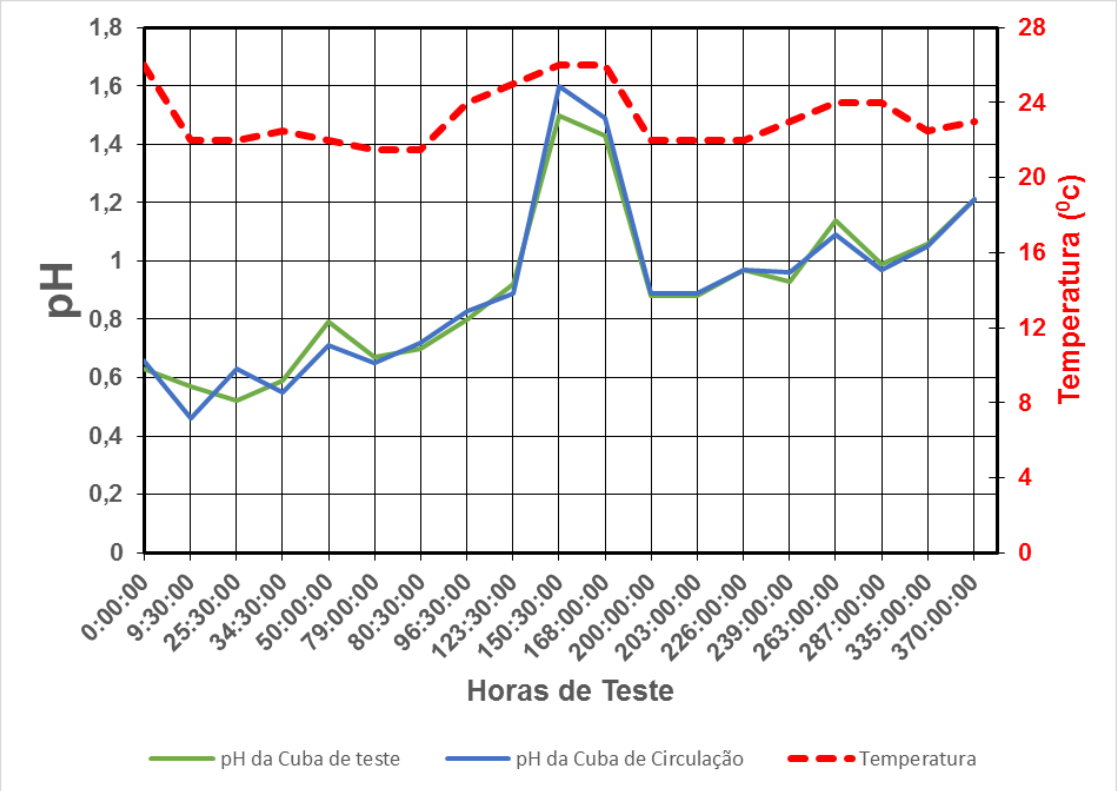


Figura 4.13 – Variação do pH e temperatura da solução durante o teste, na cuba com o meio circulante.

Considerando que a corrosão dos espécimes foi uniforme a taxa de corrosão foi calculada por perda de massa, usando a fórmula matemática da norma NACE TM0169/G31-12a, descrita na equação (4.1).

$$\text{Taxa de Corrosão} = \frac{K.W}{A.T.D} \qquad (4.1)$$

Sendo a taxa de corrosão medida em (mm/ano).

K = fator de compatibilidade para as unidades de medidas = $8{,}76.10^4$ = 87600.

W = perda de peso (peso inicial – peso final) aferida após exposição em (gramas), com precisão de 1 mg.

A = área de exposição inicial do espécime em (cm^2), com precisão de 0,01 cm^2.

T = tempo de exposição em (horas), com precisão de 0,01 horas.

D = densidade do material em (gramas/cm^3), valor tirado do ASTM G1, para o material ensaiado = 7,85 gramas/cm^3.

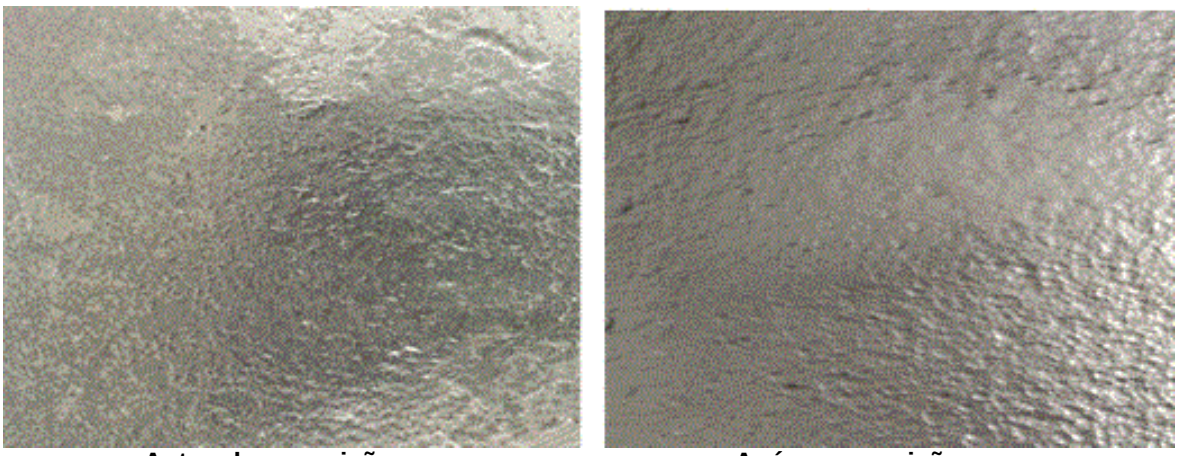
Substituindo-se os valores definidos na equação (4.1) tem-se a equação (4.2) usada nos cálculos. Os valores obtidos na cuba de teste com circulação do meio estão relacionados na tabela 4.6. O apêndice B, mostra o cálculo do intervalo de confiança das taxas de corrosão.

$$\text{Taxa de Corrosão (mm/ano)} = \frac{(87600).\mathrm{W}}{\mathrm{A.T.}(7{,}85)} \tag{4.2}$$

Tabela 4.6 – Taxas de corrosão calculadas dos espécimes expostas no meio com circulação.

ESPÉCIME	ÁREA INICAL (cm2)	PESO INICIAL (gramas)	PESO APÓS A EXPOSIÇÃO (gramas)	PERDA DE PESO (gramas)	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (horas)	TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)
Sem solda	142,27	744,48	601,27	143,21	382,00	29,41
Solda sem TT	139,30	686,42	524,21	162,21	382,00	34,02
Solda com TT	146,38	752,30	607,46	144,84	382,00	28,91
Solda com PR	147,45	696,56	534,58	161,98	382,00	32,09

A Figura 4.14 mostra a superfície do espécime sem solda antes e após a exposição, onde foi constatada uma corrosão com perda de espessura uniforme.



Antes da exposição **Após a exposição**

Figura 4.14 – Superfície do espécime sem solda, antes e após a exposição.

Na Figura 4.15 podem ser observadas as superfícies antes e após a exposição do espécime soldada, sem tratamento. Pode ser constatada uma corrosão uniforme, merece ser destacado a formação de um vale na ZTA da solda que não existia antes da exposição. A profundidade desse vale ficou entre 0,2 e 0,7 mm (precisão de 0,1 mm), tendo como referência a superfície corroída do metal base.

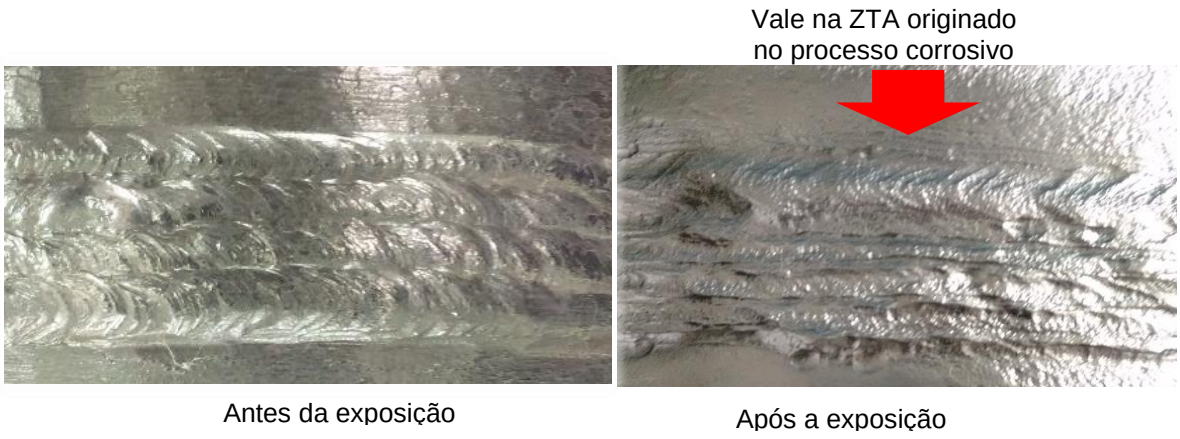


Figura 4.15 – Comparação da solda sem tratamento antes e após a exposição.

Na inspeção visual da solda tratada foi constatada a preservação da altura do passe de cobertura, ou seja, a perda de espessura do metal base, ZTA e zona fundida foram aproximadamente iguais, caracterizando uma corrosão uniforme, como mostrado na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Espécime com tratamento antes e após a exposição.

A Figura 4.17, mostra a comparação do espécime com passe de revenimento antes e após a exposição. Pode ser observado a formação de uma canaleta na ZTA da solda, como resultado da corrosão uniforme de um vale já existente feito com a lixadeira anterior a exposição. Novamente a corrosão foi uniforme.

Figura 4.17 – Espécime com passe de revenimento antes e após a exposição.

4.5.2 TESTES NA CUBA COM O MEIO ESTAGNADO

A Figura 4.18, mostra o comportamento das medições de pH e temperatura na cuba com o meio estagnado. Nesse teste, foram constatados quatro aumentos rápidos na concentração dos íons hidrogênio da solução que ocorreram após: 85h30min, 165h00min, 287h00min e 348h30min de exposição. A recomposição foi feita com a mesma solução inicial de ácido sulfúrico na concentração de 0,25 Molar, para um pH entorno de 1,0. Logo após a correção do pH a temperatura teve um aumento, ficando entre 25 e 29^{0}C, devido a reação do meio a colocação do ácido, cerca de 2 horas após a temperatura retornou a temperatura anterior. Fora essas situações de correção do pH, foram medidas temperaturas acima de 23^{0}C também nos dias sem movimento no laboratório, como: finais de semana e feriados, onde o ar condicionado foi desligado, nas demais horas a temperatura se manteve estável entre 22 e 23^{0}C.

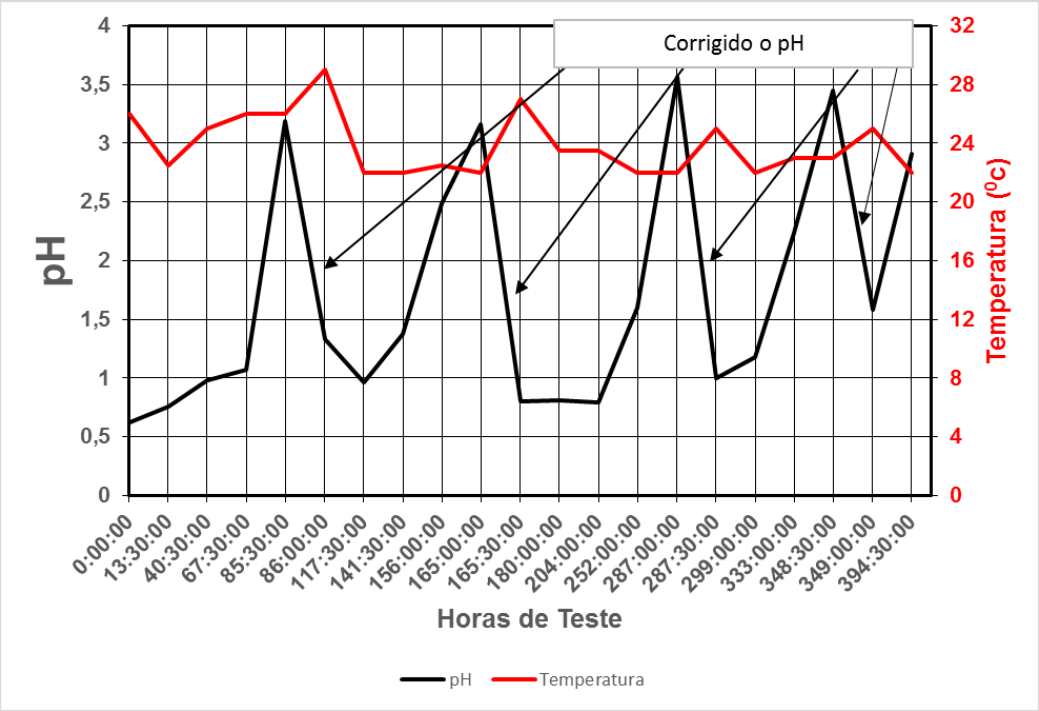


Figura 4.18 – Variação do pH e temperatura da solução durante o teste, na cuba com o meio estagnado.

A Figura 4.19 mostra a superfície do espécime sem solda antes e após a exposição, onde foi constatada uma corrosão com perda de espessura uniforme.

Figura 4.19 – Superfície dos espécimes antes e após a exposição, no meio estagnado.

Na Figura 4.20 podem ser observadas as superfícies antes e após a exposição do espécime soldada, sem tratamento. Pode ser observado uma corrosão uniforme, nessa exposição não foi identificado o vale na ZTA, como no caso do meio circulante.

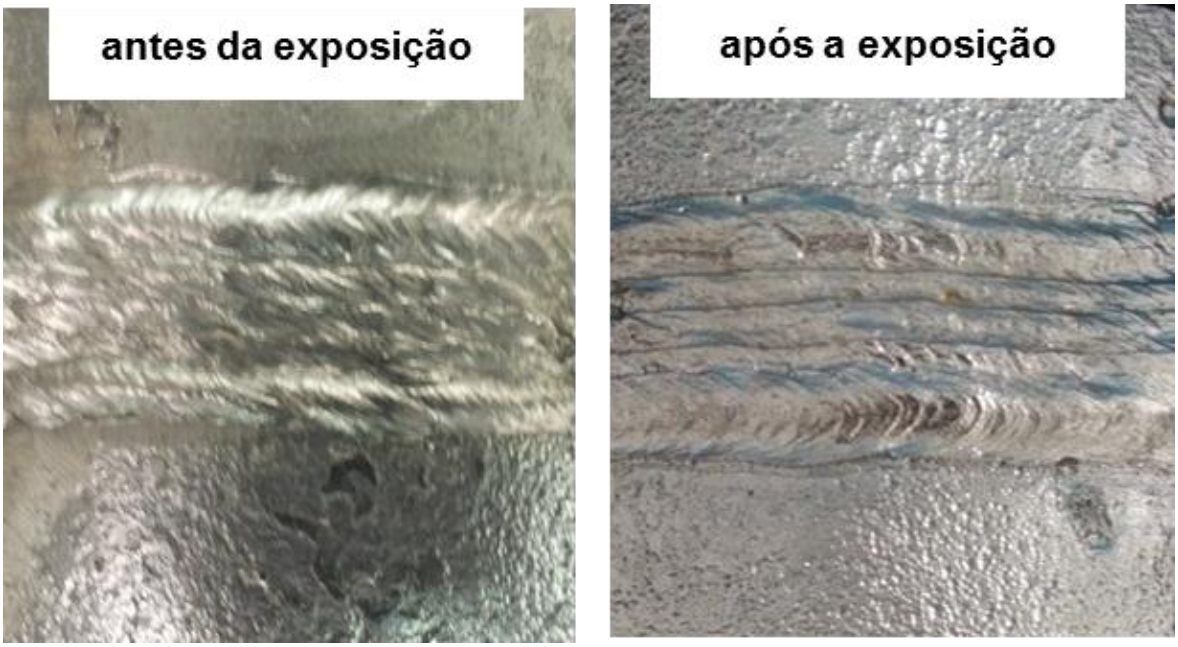


Figura 4.20 – Espécimes soldas sem tratamento antes e após exposição, no meio estagnado.

Na inspeção visual da solda tratada foi constatada a preservação da altura do passe de cobertura, ou seja, a perda de espessura do metal base, ZTA e zona fundida foram aproximadamente iguais, caracterizando uma corrosão uniforme, como mostrado na Figura 4.21, igual ao verificado no meio com circulação.

Figura 4.21 – Espécimes soldas com tratamento antes e após a exposição no meio estagnado.

A Figura 4.22, mostra a comparação do espécime com passe de revenimento antes e após a exposição. Pode ser observado a formação de uma canaleta na ZTA da solda, como resultado da corrosão uniforme de um vale já existente feito com a

lixadeira anterior a exposição. Novamente a corrosão foi uniforme.

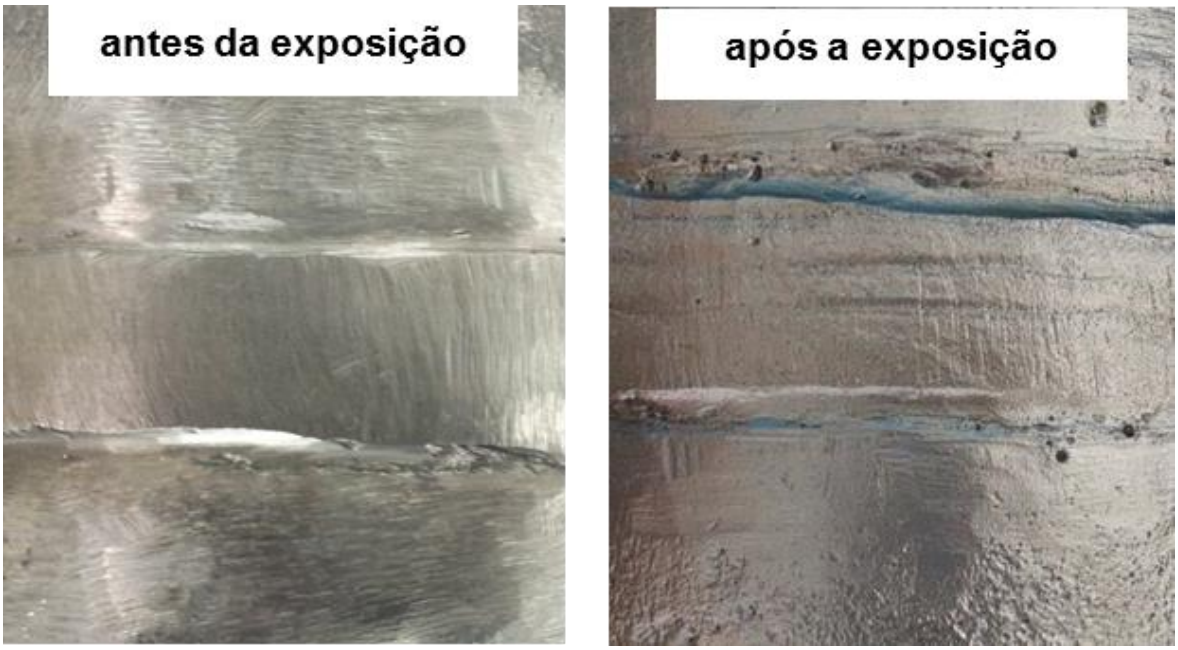


Figura 4.22 – Espécimes soldadas com passe de revenimento antes e após exposição no meio estagnado.

Considerando que a corrosão dos espécimes foi uniforme, a exemplo de como já foi realizado para os espécimes imersas no meio circulante, a taxa de corrosão foi calculada por perda de massa, usando a fórmula matemática da norma NACE TM0169/G31-12a, descrita na equação 4.3. Os valores obtidos estão relacionados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Taxas de corrosão dos espécimes exposta no meio estagnado.

MEDIDA DA TAXA DE CORROSÃO POR PERDA DE MASSA - MEIO ESTAGNADO						
ESPÉCIME	ÁREA INICAL (cm2)	PESO INICIAL (gramas)	PESO APÓS A EXPOSIÇÃO (gramas)	PERDA DE PESO (gramas)	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (horas)	TAXA DE CORROSÃO (mm/ano)
Sem solda	145,94	766,56	680,90	85,66	394,50	16,60
Solda sem TT	140,80	746,37	653,73	92,64	394,50	18,61
Solda com TT	144,78	783,13	700,33	82,80	394,50	16,18
Solda com PR	137,70	667,45	577,50	89,95	394,50	18,48

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi executada uma análise estatística das taxas de corrosão calculadas nos dois testes, utilizando o aplicativo Minitab. Primeiramente foi calculado o erro da taxa de corrosão através da determinação dos valores da média e desvio padrão, os resultados estão expressos nas tabelas 4.8 (pág. 65) e 4.9 (pág. 66) e nas figuras 4.23 (pág. 65), 4.25 (pág. 67), para cada teste de corrosividade.

Também com o uso do aplicativo Minitab foi realizado o teste de Tukey para a comparação dos valores médios determinados para as taxas de corrosão e os resultados estão plotados nas figuras 4.24 (pág. 66), para o teste realizado no meio com fluxo e 4.26 (pág. 67), para o teste realizado no meio sem fluxo.

4.6.1 TESTE ESTATÍSTICO NO MEIO COM FLUXO

A Tabela 4.8 mostra o intervalo de confiança calculado para cada taxa de corrosão dos espécimes após imersão no meio com fluxo, calculados para um nível de confiança de 95%.

Tabela 4.8 – Intervalo de confiança das taxas de corrosão para o meio com fluxo.

Espécime	Taxa de Corrosão (mm/a)		
	Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança
Sem Solda	29,414	0,480	29,061 a 29,767
Com a Solda Tratada	28,911	0,470	28,558 a 29,264
Com a Solda Com Passe de Revenimento	32,100	0,543	31,747 a 32,453
Com a Solda Sem Tratamento	34,025	0,579	33,672 a 34,378

Na Figura 4.23 observa-se o intervalo de confiança da taxa de corrosão para os espécimes testados no meio com fluxo.

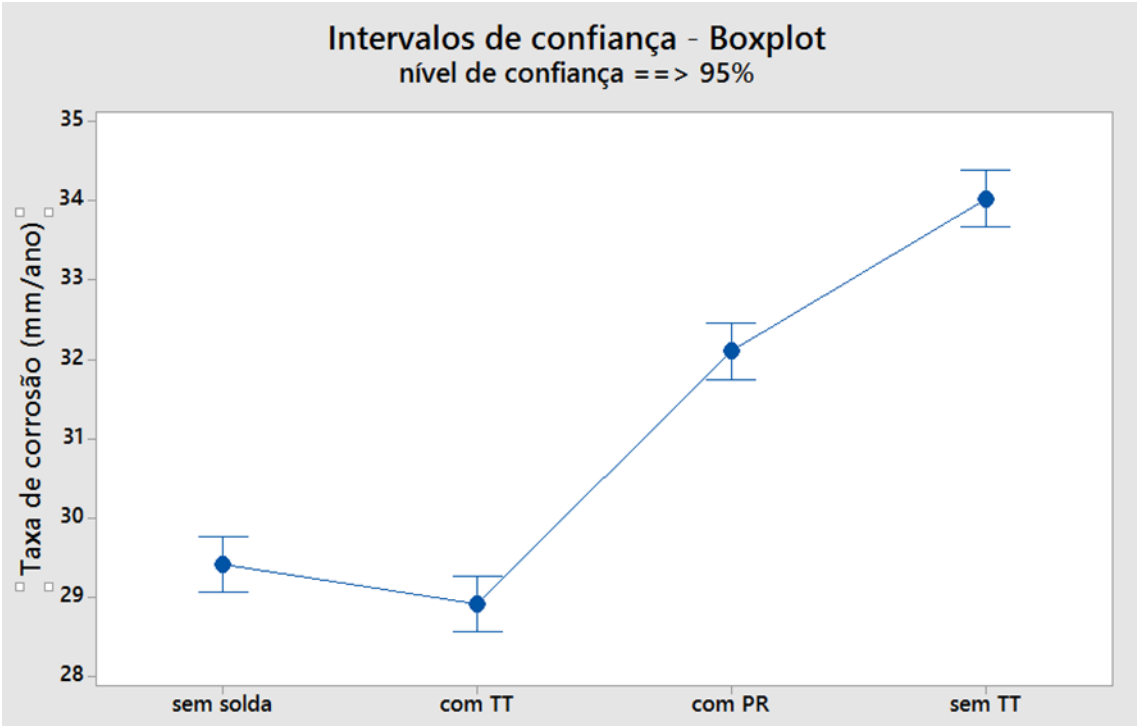


Figura 4.23 – Intervalo de confiança das taxas de corrosão médias do meio com fluxo.

A Figura 4.24 mostra o resultado do teste de Tukey para comparação das taxas de corrosão médias dos espécimes. A análise é feita comparando-se a diferença entre duas taxas de corrosão, se o zero estiver no intervalo de confiança a diferença entre as taxas não é significativa, e elas podem ser consideradas estatisticamente iguais. O teste foi realizado com um nível de confiança de 95%. Esse resultado mostra que as taxas de corrosão do espécime sem solda e o espécime com a solda tratada são estatisticamente iguais.

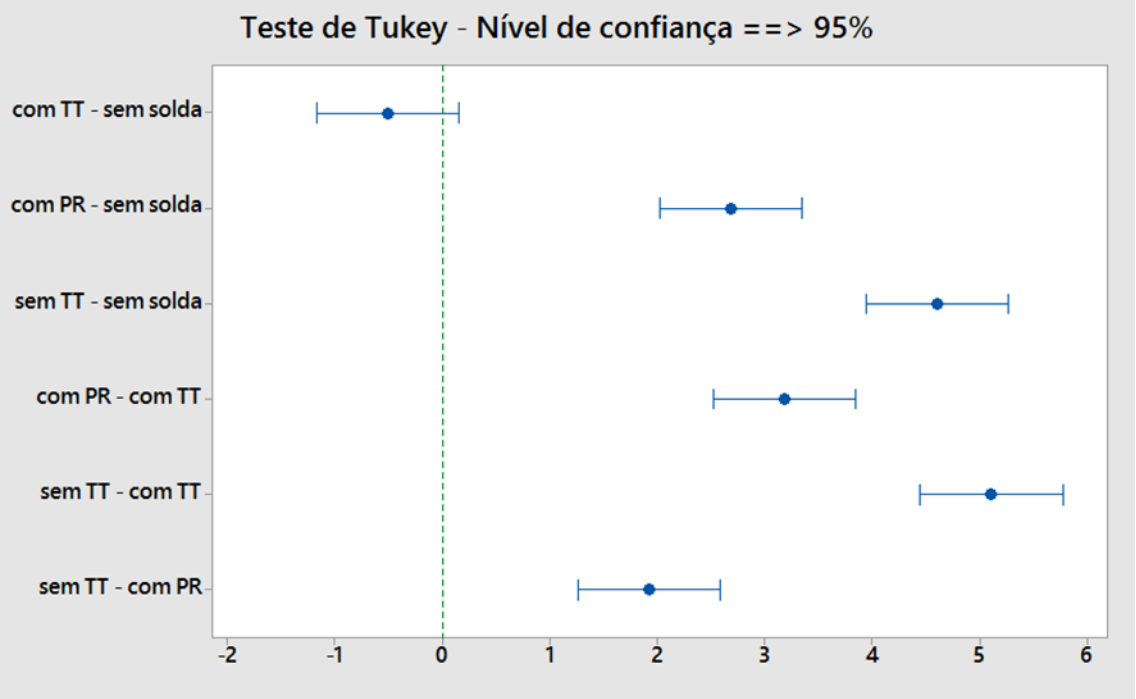


Figura 4.24 – Comparação das taxas de corrosão médias no meio com fluxo.

4.6.2 TESTE ESTATÍSTICO NO MEIO ESTAGNADO

A Tabela 4.9 mostra o intervalo de confiança calculado para cada taxa de corrosão dos espécimes após imersão no meio estagnado, calculados para um nível de confiança de 95%.

Tabela 4.9 – Intervalo de confiança das taxas de corrosão para o meio estagnado.

Espécime	Taxa de Corrosão (mm/a)		
	Média	Desvio Padão	Intervalo de confiança
Sem Solda	16,606	0,275	16,4055 a 16,8074
Com a Solda Tratada	16,181	0,265	15,9796 a 16,3815
Com a solda com Passe de Revenimento	18,483	0,323	18,282 a 18,684
Com a Solda sem tratamento	18,616	0,317	18,415 a 18,817

Na Figura 4.25 observa-se o intervalo de confiança da taxa de corrosão para os espécimes no meio estagnado.

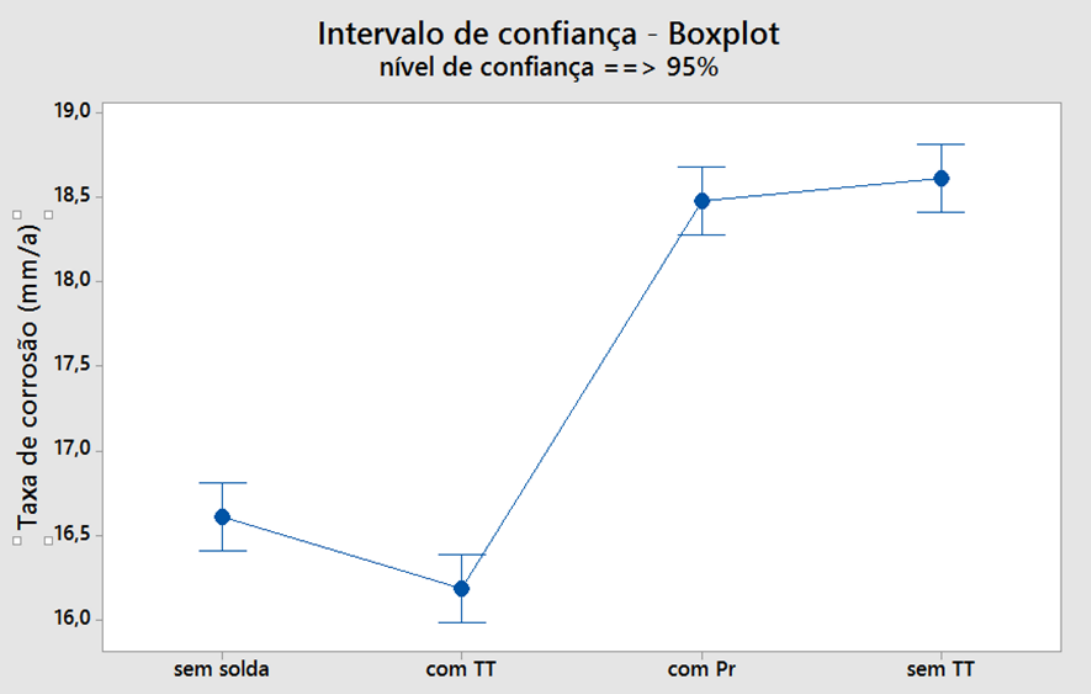


Figura 4.25 – Intervalo de confiança das taxas de corrosão médias do meio estagnado.

A Figura 4.26 mostra o resultado do teste de Tukey para comparação das taxas de corrosão médias dos espécimes. A análise é feita comparando-se a diferença entre duas taxas de corrosão, se o zero estiver no intervalo de confiança a diferença entre as taxas não é significativa, e elas podem ser consideradas estatisticamente iguais. O teste foi realizado com um nível de confiança de 95%. Esse resultado mostra que as taxas de corrosão do espécime contendo a solda sem tratamento e o espécime com a solda onde foi aplicado o passe de revenimento são estatisticamente iguais. Observa-se também que a diferença entre as taxas de corrosão dos espécimes sem solda e com a solda tratada está muito próxima da insignificância, ou seja, estatisticamente são aproximadamente iguais.

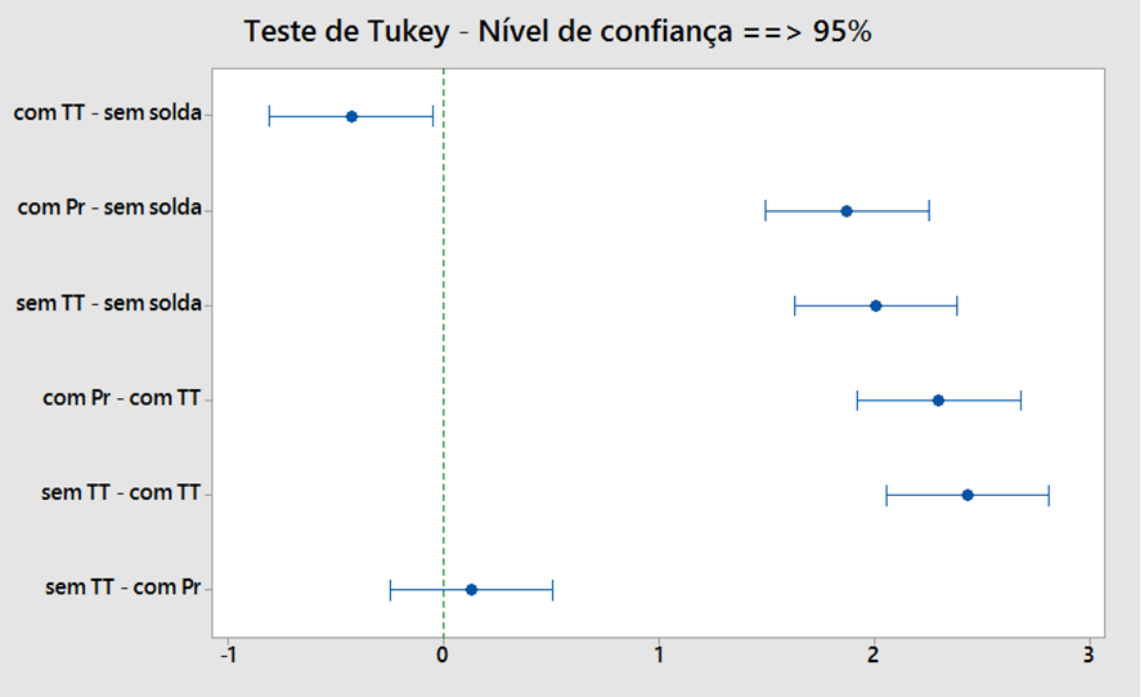


Figura 4.26 – Comparação das taxas de corrosão médias no meio estagnado.

5 DISCUSSÃO

O aumento do pH observado nas células e a formação de bolhas junto os espécimes são explicados através da reação catódica de meio ácido sem aeração, expressa pela equação (5.1).

$$2H^{+} + 2e \rightarrow 2H^{0} \rightarrow H_2 \quad (5.1)$$

A presença de íons metálicos dissolvidos no meio e depositados no fundo das cubas é o resultado da reação anódica de dissolução do metal, tendo como reação principal o envio de íons Fe^{+2} para a solução, conforme a equação (5.2).

$$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e \quad (5.\ 2)$$

Os resultados das análises químicas tanto do metal base quanto dos depósitos estão dentro das especificações, como mostrado nas tabelas 4.1 e 4.2 (pág. 45). Do ponto de vista de resistência à corrosão é importante comparar as quantidades de carbono, cromo e molibdênio. O cromo e molibdênio em solução aumentam a resistência à corrosão e o carbono, reduz a resistência à corrosão, devido a formação de mais cementita (SAMI; et al., 2013).

O resultado do teste estatístico de Tukey mostrou que não existe diferença significativa entre as taxas de corrosão dos espécimes com a solda tratada e sem solda, expostos no meio com fluxo, ou seja, essas taxas de corrosão são estatisticamente iguais (Figura 4.24 – pág.65). Esse comportamento está associado a eficiência do tratamento térmico aplicado na solda, que foi comprovado pela redução da dureza e pelo revenimento da martensita na solda e ZTA. As demais comparações realizadas mostraram que existe significância nas outras taxas de corrosão.

Para os espécimes expostos no meio estagnado, não existe diferença significativa entre os espécimes com a solda sem tratamento e com a solda onde foi aplicado o passe de revenimento, também nesse caso, essas taxas de corrosão são estatisticamente iguais (Figura 4.26 – pág. 67). Para as taxas de corrosão menores, devido a pequena área de solda em relação a área exposta, a eficiência do passe de revenimento na recuperação da martensita não teve influência significativa na corrosão.

Ainda para o meio estagnado, as taxas de corrosão dos espécimes com a solda tratada e sem solda apesar de terem apontado que existe significância entre elas, os valores estão muito perto da não significância, o que confirma a eficiência do tratamento térmico realizado na solda quanto a melhora na resistência à corrosão.

As linhas de tendência traçadas na Figura 5.1 mostram que as taxas de corrosão médias, medidas no meio circulante e estagnado mantiveram as relações de resistência à corrosão dos espécimes similares, ou seja, os espécimes contendo soldas sem tratamento após soldagem tiveram maior corrosão que as demais. Os espécimes onde foi aplicado o passe de revenimento nas soldas, tiveram uma taxa de corrosão entre o espécime com a solda sem tratamento e o espécime com a solda tratada.

Deve ser tomado o cuidado com as taxas de corrosão calculadas porque elas foram obtidas usando espécimes em que a área com solda da superfície exposta foi aproximadamente 21% (± 2%) da área total. Para relações de áreas diferentes a taxa de corrosão será diferente.

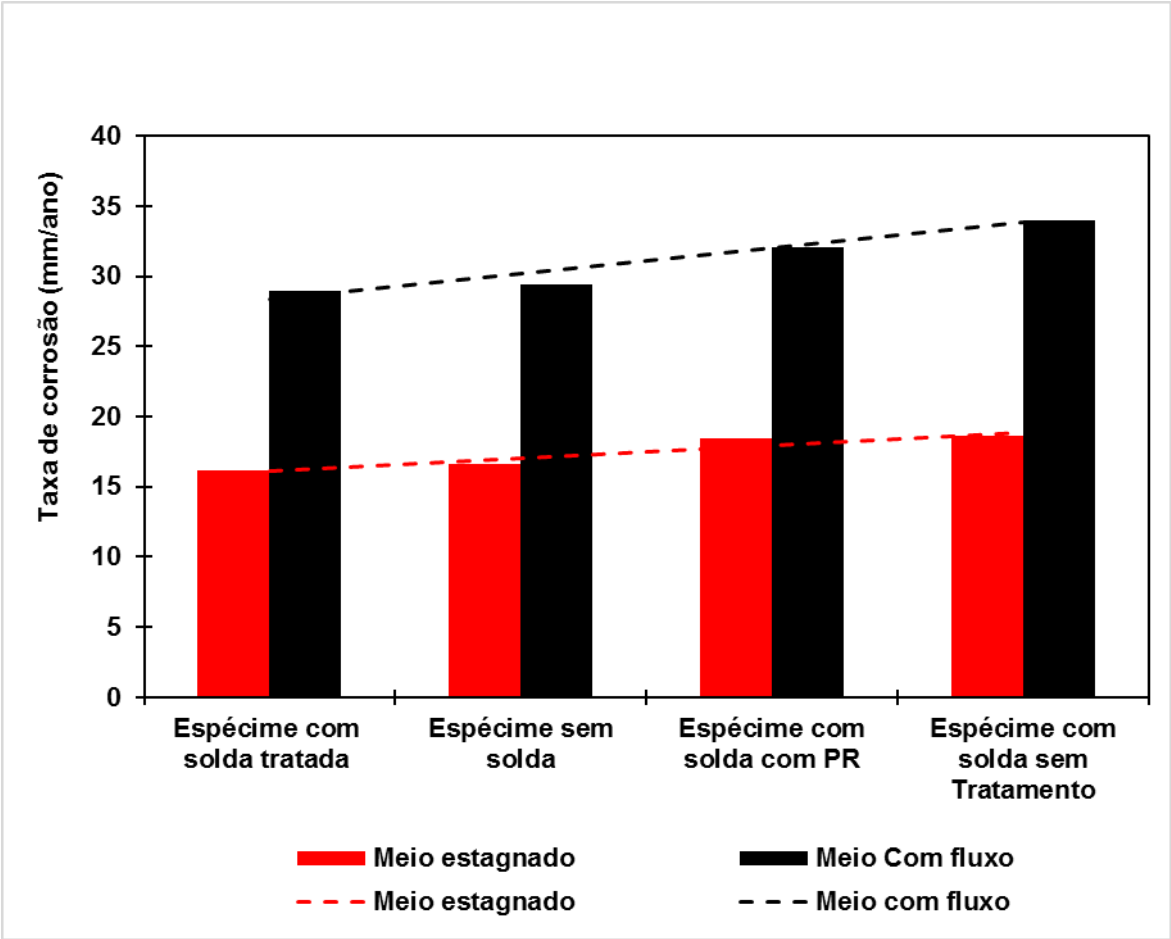


Figura 5.1 – Comparação da taxa de corrosão dos espécimes.

Fontana e Greene (1982), afirmam que em meios com agitação ocorre uma redução da espessura da camada de difusão do hidrogênio formada junto ao metal exposto, isso aumenta a corrente limite da reação de evolução do hidrogênio favorecendo a ocorrência dessa reação, com consequente aumento da taxa de corrosão. Assim, espera-se que, se forem mantidas as mesmas condições de volume, temperatura e pH, os espécimes expostos no meio com circulação terão taxas de corrosão maiores do que no meio estagnado.

Nos testes realizados, as diferenças nas taxas de corrosão também foram afetadas pela diferença do volume de solução usada. Na cuba com circulação do meio o volume usado foi 12 vezes maior do que volume usado na cuba com o meio estagnado.

A Figura 5.2 permite verificar a influência dos procedimentos de soldagem utilizados na taxa de corrosão. Assim, observa-se que no espécime contendo a solda sem tratamento ocorreu um aumento de aproximadamente 15% na taxa de corrosão, em relação ao espécime sem solda, quando exposto ao meio com circulação. Esse aumento foi reduzido para aproximadamente 12% no meio estagnado. Esses números mostram que a presença da solda sem tratamento no espécime aumentou a corrosão.

Ainda na Figura 5.2, observa-se que o espécime contendo a solda com passe de revenimento, aumentou a taxa de corrosão, porém menos acentuado do que o verificado para o espécime soldado sem tratamento. No teste com o meio em circulação a taxa de corrosão aumentou cerca de 9% em relação ao espécime sem solda e 11% no meio estagnado. Esse fato mostra que a melhora na taxa de corrosão, obtida com a recuperação da microestrutura, com a aplicação do passe de revenimento, não foi observado com menores taxas de corrosão, porque a relação entre a área soldada do espécime e a área exposta é de apenas 21%.

O maior tamanho na ZTA da solda sem tratamento, como mostrado na Figura 4.1 (pág. 50), deve ter influenciado para que ZTA da solda sem tratamento tivesse maior corrosão, como está destacado na Figura 5.3. Entretanto, como a relação entre a área da solda e a área exposta é de apenas 21%, essa interferência teve influência praticamente desprezível na taxa de corrosão calculada para a espécime com a solda sem tratamento.

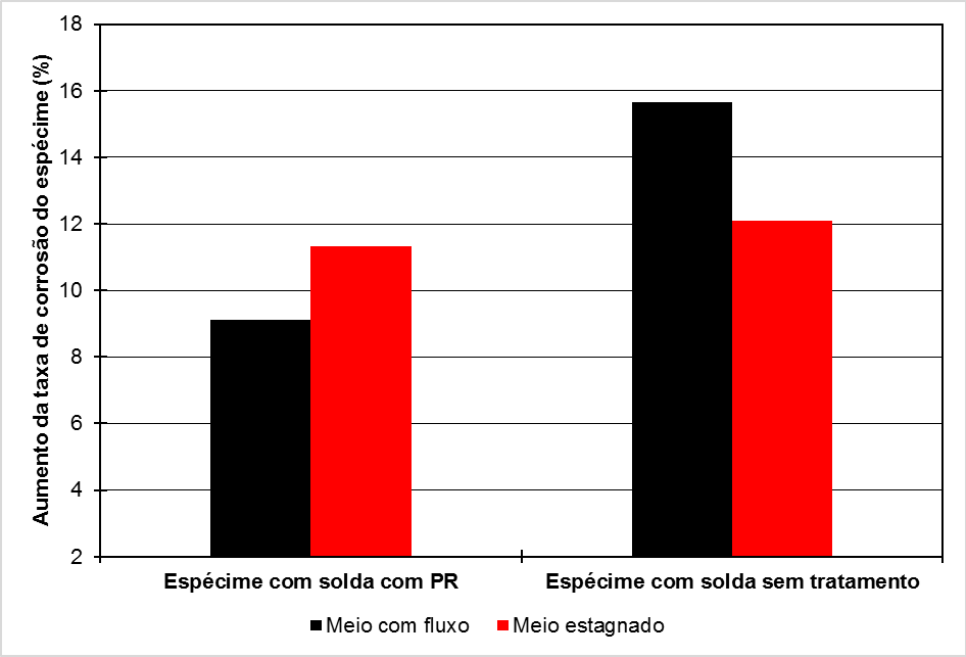


Figura 5.2 – Aumento na taxa de corrosão dos espécimes soldados em relação ao espécime sem solda.

A Figura 5.3, mostra a seção transversal nas soldas após a exposição ao meio, nas soldas sem tratamento e com passe de revenimento observa-se pequenas linhas escuras acompanhando o desenho de cada passe de solda. Essas linhas escuras são pequenos vales formados devido a uma maior corrosão na zona termicamente afetada pelo calor de cada passe, esses vales não aparecem na solda tratada, confirmando o um aumento na resistência à corrosão desta solda devido ao tratamento.

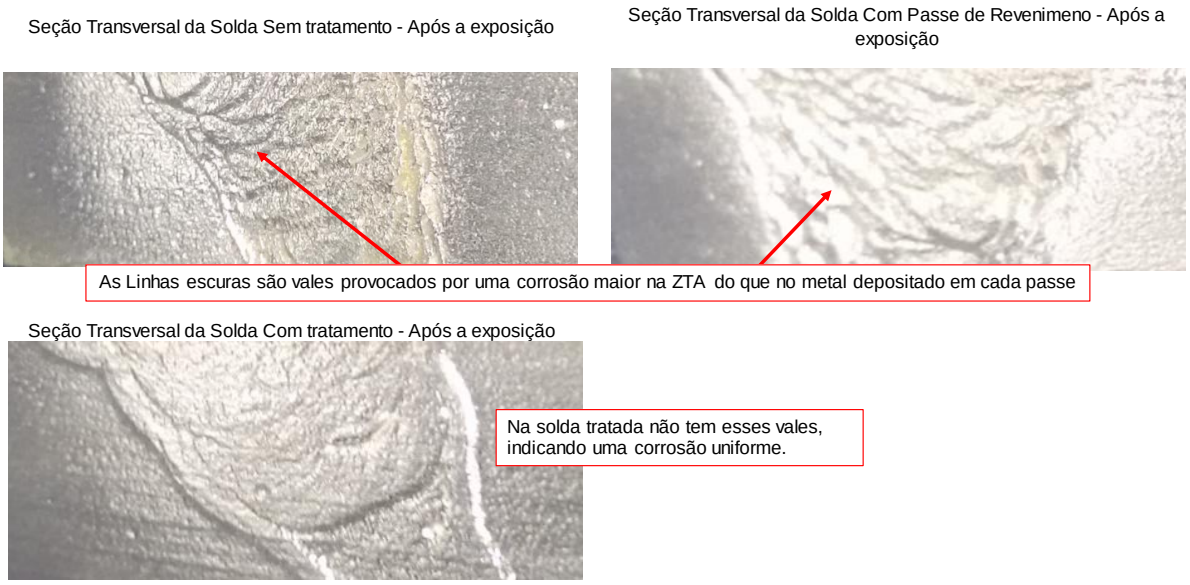


Figura 5.3 – Presença de pequenos vales na ZTA de cada passe nas soldas sem tratamento e com passe de revenimento.

O aumento na taxa de corrosão dos espécimes com a solda sem tratamento e com passe de revenimento estão associados a tensão residual de soldagem e a microestrutura martensítica nas zonas fundida e termicamente afetada pelo calor. O nível das tensões residuais nessas duas soldas é maior do que na solda com tratamento, como constatado pelos valores de dureza. Davis (2006) afirma que o nível das tensões residuais de soldagem está relacionado, diretamente, com os valores da dureza. Experiências realizadas por Sami e outros (2013), para o aço carbono, mostraram que a martensita, por possuir maior quantidade de carbono do que a bainita atua como cátodo, enquanto a bainita, contém maior quantidade de ferro e atua como ânodo.

Como a martensita revenida e a bainita tem uma resistência à corrosão similar (SAMI; et al., 2013) as taxas de corrosão dos espécimes sem solda e com a solda tratada foram aproximadamente iguais em ambos os testes.

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram, uma associação entre taxa de corrosão, dureza e microestrutura, para os testes com o meio com circulação e estagnado. Os espécimes com a solda sem tratamento e com passe de revenimento, que tem soldas com maior dureza e maior quantidade de martensita na sua microestrutura, tiveram uma taxa de corrosão maior do que os espécimes com a solda tratada e sem solda. Estes dois últimos espécimes tem uma estrutura de bainita ou martensita revenida, estruturas de menor dureza.

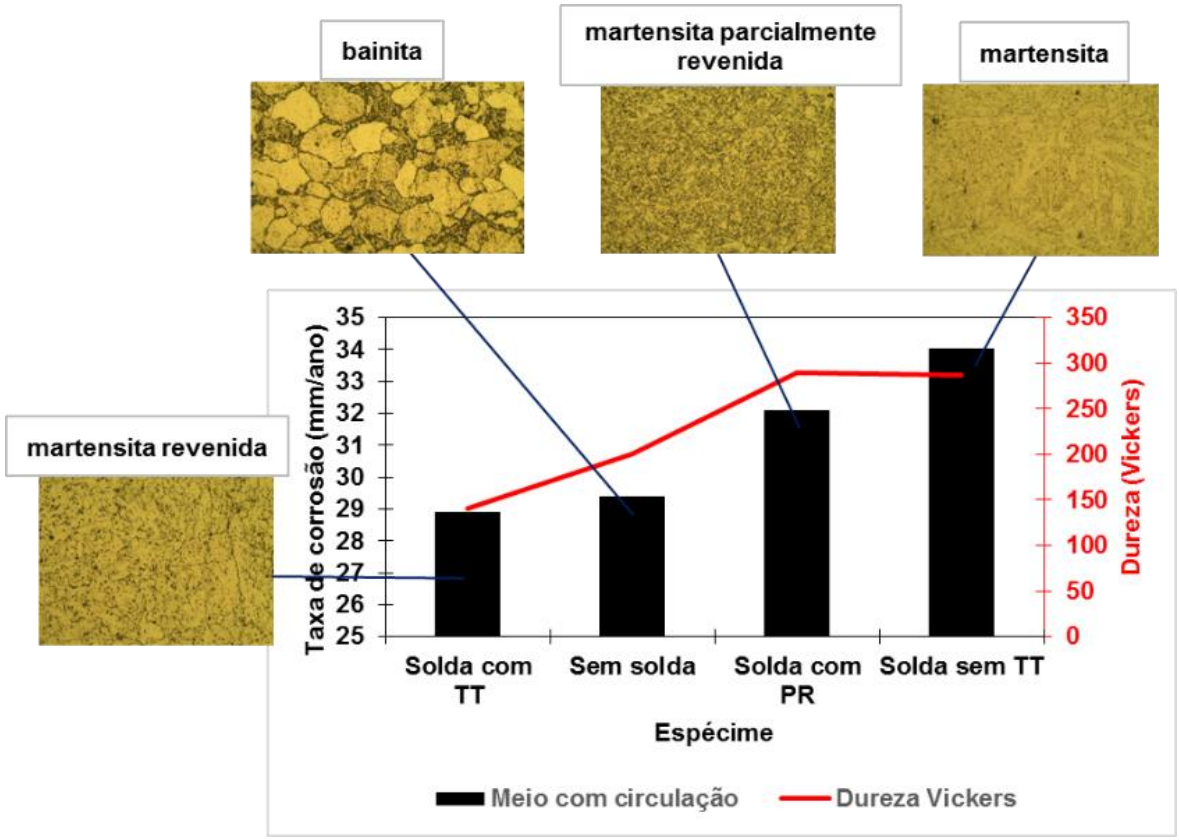


Figura 5.4 – Relação entre taxa de corrosão, dureza e microestrutura, no meio com circulação.

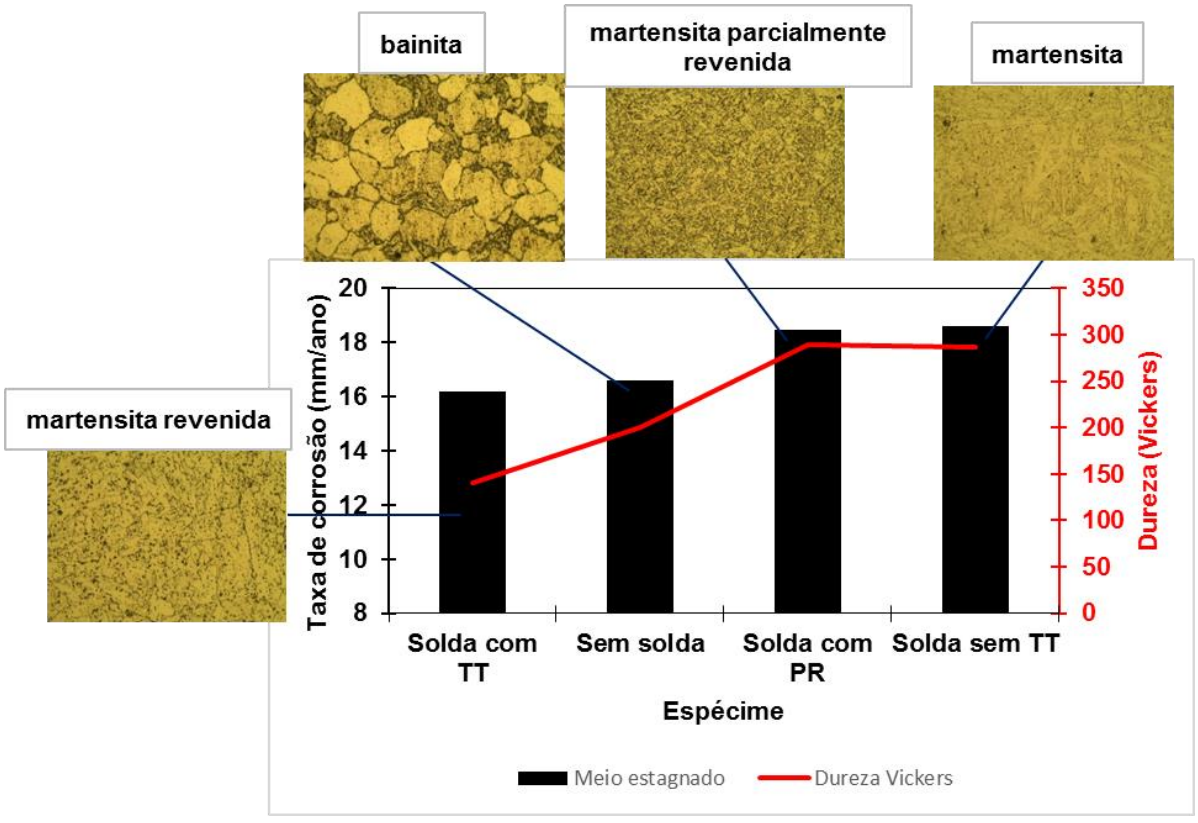


Figura 5.5 – Relação entre taxa de corrosão, dureza e microestrutura, no meio estagnado.

A Figura 5.6 mostra a influência da circulação do meio e do volume da solução nas taxas de corrosão. A circulação do meio aumentou a taxa de corrosão pela redução da espessura da camada de difusão do hidrogênio junto ao metal e, o volume maior da solução, aumentou à corrosão pelo maior suprimento de íons hidrogênio na solução. As linhas tracejadas indicam que a tendência a corrosão dos espécimes testados foi mantida, com uma diferença menor entre as taxas de corrosão.

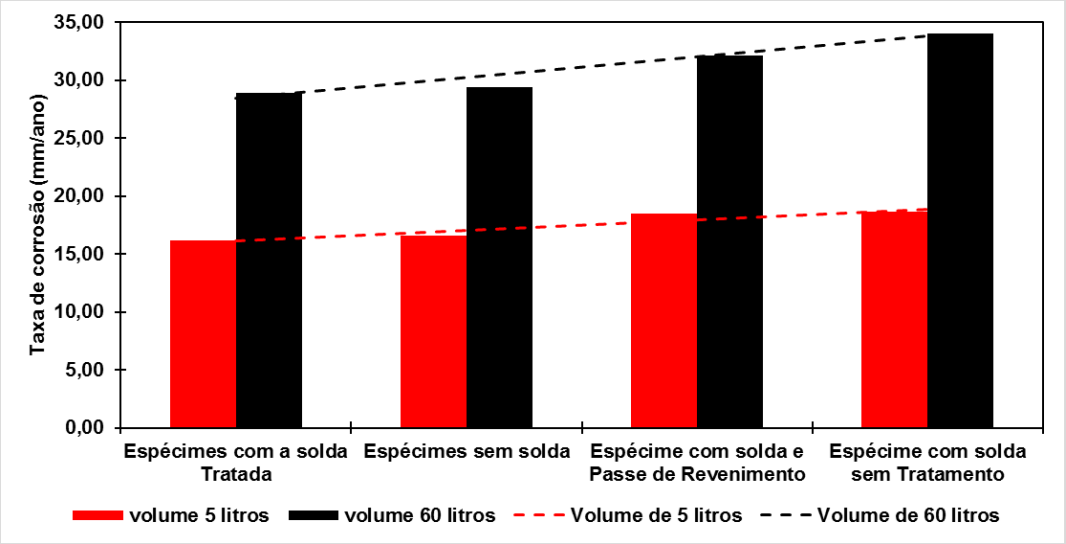


Figura 5.6 – Influência da velocidade do meio e do volume da solução nas taxas de corrosão.

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Em todos os espécimes, contendo ou não solda, e nos dois testes, a corrosão foi uniforme, sem a presença de pitting.

Foi constatada maior corrosão na zona termicamente afetada pelo calor nos espécimes contendo as soldas sem tratamento e com passe de revenimento.

O espécime contendo a solda com passe de revenimento teve menor taxa de corrosão do que o espécime contendo a soldas sem tratamento, mostrando que o passe de revenimento melhora a resistência à corrosão da solda. Este resultado ficou mais claro no meio com fluxo, pois com maiores taxas de corrosão a diferença na resistência à corrosão foi mais evidente, devido a pequena área de solda contida na área exposta (21%).

Os espécimes com as soldas tratadas termicamente para alívio de tensões tiveram taxas de corrosão estatisticamente iguais aos espécimes sem solda. Esse resultado mostra que o tratamento térmico além de recuperar as propriedades mecânicas da junta também recupera a resistência à corrosão.

A pequena área da solda contida na área exposta do metal ao meio reduziu a influência da solda na taxa de corrosão, por esse motivo as taxas de corrosão dos espécimes contendo a solda com passe de revenimento e a solda sem tratamento tiveram taxas de corrosão estatisticamente iguais no meio estagnado, onde menores taxas de corrosão não foram suficientes para evidenciar a diferença na resistência à corrosão das soldas.

Os valores das taxas de corrosão calculados são válidos apenas nas condições dos testes realizados, principalmente no que se refere a relação entre a área da solda e a área total de exposição e a relação entre o volume da solução e à área exposta ao meio.

As microestruturas de martensita revenida e bainita, presentes nos espécimes testados, tiveram resistência à corrosão similares, já a presença de martensita aumentou a taxa de corrosão do espécime com a solda sem tratamento.

Como sugestões para continuar essa pesquisa sugere-se a realização das verificações descritas a seguir:

a) Quantificar a influência da relação entre o volume da solução e área de exposição do metal na corrosão em meio ácido, com pH menor do que 3, na temperatura ambiente, para um aço na especificação 2,25Cr1,0Mo.

b) Quantificar a influência da microestrutura do aço na especificação 2,25Cr1,0Mo, nas condições recozido, normalizado e revenido, temperado e temperado revenido, em meio ácido, com pH menor do que 3, na temperatura ambiente.
c) Quantificar a influência da movimentação do meio na taxa de corrosão, usando a mesma relação entre o volume da solução e a área de exposição do metal.
d) Avaliar a influência do tamanho da zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) de uma solda sem tratamento térmico de alívio de tensão na taxa de corrosão da junta soldada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, H.; ADOLPHSON, D. R.; AGARWAL, D. C.; et al. **Corrosion of Weldments.** American Society for Metals Handbook. vol.13, pág. 771 a 773, 1992. 3.455 p.

ADAMS, B.L.; ALIYA, D.; ALMAN, D.; et al. **Metallography and Microstructure.** American Society for Metals Handbook. vol. 9, pág. 145, 461, 462 e 1430, 2004, 2.733 p.

AGGEN, N. C.; AKSTENS, F.W.; ALLEN, C. M.; et al . **Microstrutures, Processing, and Properties of Steels.** American Society for Metals Handbook. vol. 1, pág. 301 a 303, 1993, 2.521 p.

AGGEN, N. C.; AKSTENS, F.W.; ALLEN, C. M.; et al. **Classification and designation of Carbon of Low Alloy Steels.** American Society for Metals Handbook. vol. 1, pág. 354 a 389, 1993, 2.521 p.

ALIA, B. L.; ALLEY, R.L.; APBLETT JR, W.R.; et al. **Welding, Brazing and Soldering.** American Society for Metals Handbook. vol.6, pág. 325, 1993, 2.873 p.

ALIYA, D. **Physical Metallurgy Concepts in Interpretation of Microstrucutres.** American Society for Metals Handbook. vol. 9, pág. 144 a 145, 2004, 2.733 p.

ASHBY, M. F. A.; DAVID R. H. J. **Engineering Materials 2 – In introduction to microstructure, processing in design.** Butterworth Heinemann, Oxford. 2ª ed. pág. 14 a 21 e 114 a 116, 1999, 393 p.

ASME B 31.3. **Process Piping.** American National Standard, pág. 69, 2002, 346 p.

ASME B 36.10. **Welded and seamless wrought steel pipe.** American Society of Mechanical Engineering. 2004, 26 p.

ASME I. **Rules for Construction of Power Boilers.** American Society of Mechanical Engineering. 2013, 318 p.

ASME II parte C. **Specification for welding rods, electrode, and filler Metals.** American Society of Mechanical Engineering. 2010, 802 p.

ASME IX. **Welding, Brazing, and Fusing Qualifications.** American Society of Mechanical Engineering. 2013, 386 p.

ASME PCC2. **Repair of Pressure Equipment and Piping.** American Society of Mechanical Engineering. 2011, 218 p.

ASME VIII division 1. **Rules for construction of pressure vessels.** American Society of Mechanical Engineering. Parte UCS, 2011, 28 p.

ASTM A 335. **Standard specification for seamless ferritic alloy steel pipe for high temperature service.** American Society for Testing and Materials. 2011, 10 p.

ASTM E 384. **Standard test method for Knoop and Vickers hardness of materials.** American Society for Testing and Materials. 2011, 43 p.

ASTM E 407. **Standard practice for microetching Metals and alloys**. American Society for Testing and Materials. 1999, 21 p.

BRANCO, F. K. **Influência da microestrutura na anisotropia de chapas metálicas de diferentes aços estruturais**. Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia Industrial, SP. Departamento de Mecânica. 2007.

BRAMFITT, B. L., Lawrence, S. J. **Metallography and Microstrutures of Carbon and Low Alloy Steels.** American Society for Metals Handbook. vol. 9, pág. 1436 a 1485, 2004, 2.733 p.

BROEK, D. **Elementary engineering fracture mechanics.** Boston, 1982, 2.733 p.

CHIAVERINI, V. **Aços carbono e aços liga.** Associação Brasileira de Metais. SP - pág. 44 a 93, 1971.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** Edgar blucher Ltda. SP. 3ª ed. 1974.

CONTRERAS, A., Hernandez S. L., Galvan R., Vegas O. **The Influence of Multipe Welding Repairs of Pipelines in Residual Stress Assessment Related to Stress Corrosion Cracking.** British Journal of Applied Science & Technology. Article BJAST.2015.117. pág. 621a 634, 2015.

CUNAT, P. J. **Alloying elements in stainless steel and other chromium containing alloys.** www.euroinox.org. 2004.

DAVIS, J. R. **Corrosion of Weldments.** American Society for Metals. chapter 2. 1ª ed. pág. 14 a 24, 2006.

DAWSON, K. E. **Dissimilar Metal Welds.** Tese de doutorado apresentada na University of Liverpool. pág. 26. 2012.

EPRI / RRAC. Shame J. Findlan. **Review of Temperbead Weldink Heat Input Ratios for ASME Code Application.** 1006806. 2002.

FONTANA M. G. and Greene N. D. **Corrosion Engineering.** MacGraw Hill. 2ª ed. pág. 311. 1982.

HINES, W. W. et al. **Probabilidade e Estatística na Engenharia**. Editora LTC. pág. 298 a 300. 2006.

HU, Z. F. **Heat resistant steels, microstructure evolution and life assessment in power plants.** Thermal Power Plants. 2012.

JHA, B. B., Mishra, B. K., Satpati, B. N., et al. **Effect of thermal ageing on the evolution of microstructure ants degradation of hardness of 2,25Cr-1Mo steel.** Materials Science. Polan. vol.28. n^0 1. 2010.

JONES, R. L. **Development of two-layer deposition Techniques for the manual metal arc repair welding of thick C-Mn steel plate without postweld heat treatment.** The Welding Institute. 335/1987. 1987.

KOU, S. **Welding Metallurgy of steel.** John Wiley & Sons, Inc. Publication. 2^0 ed. pág. 354, 355, 409, 411. 2003.

KLUECH, R. L. **Elevated Temperature Properties of Ferric Steels.** American Society for Metals. – vol. 1, pág. 1429 a 1431. 1993, 2.521 p.

LARSON, R. **Estatística Aplicada**. 2ª ed. Editora Pearson Prentice Hall. pág. 2 a 63 e 220 e 224. 2008. 476 p.

MEHTA, Y., Trivedi, S., Chandra, K., Mishra, P. S. **Effect of chromium on the corrosion behavior of powder processed Fe 0,45 wt% P alloys.** Sadhama. vol. 35. part 4. pág. 469 a 480. august 2010.

MEYRICK, G. **Physical Metallurgy of steel.** pág. 36. 2002.

NACE. **Corrosion data survey.** National Association of Corrosion Engineering. 6ª ed. 1985.

NR13. **Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações.** Portaria 594 – Ministério do Trabalho e Emprego, abril de 2014.

OLIVEIRA, A.F.G. **Testes Estatísticos para Comparação de Médias**. Revista eletrônica Nutritime, v. 5, n^0 6, pág. 777 a 788. 2008.

OLIVEIRA, M. **Solda.** Equipe de Formação de Inspetores (EFI). pág. 5. 2012.

PARK, S. A., Ji, W. S., Kim, J. G. **Effect of chromium on the corrosion behavior of low alloy steels containing copper in FGD end**. International Journal of Electrochemical Science. 8 pág. 7498 a 7509, 2013.

RIGUEIRA, G., Furtado, H. C., Lisboa, M. B. et al. **Evolução microestrutural e alteração de dureza na bainita e na perlita em aços 2,25Cr1Mo após tratamento de envelhecimento.** Revista Matéria. vol. 16. n^0 4. pág. 857 a 867. 2011.

SAMI, I. A. R., Eman, A. A., Mahdi M. H. **The Influence of Microstructure on the Corrosion Rate of Carbon Steels.** Eng. & Tech. Journal, vol. 31. part. (A), n^0 10, 2013.

SPERKO, W. J. **Exploring temper bead welding.** Welding Journal, 2005.

TRIPATHY, Ipsa. **Effect of microstructure on sliding wear behavior of modified 9Cr-1Mo steel.** Dissertação de Mestrado apresentada no Department of

Metallurgical and Materials Engineering of the National Institute of Technology. Rourkela. Odisha. India. 2011.

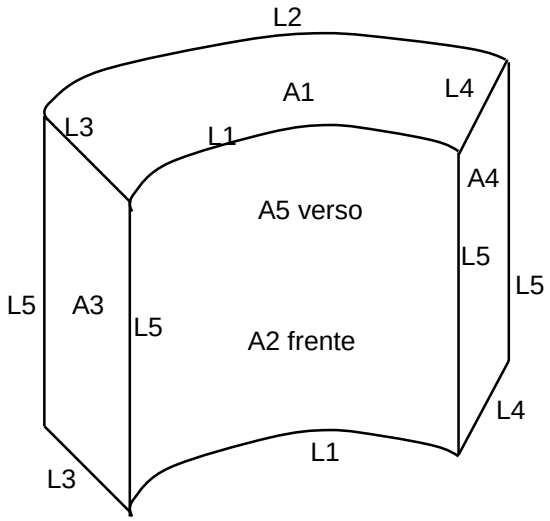
VISHNU, P. R. **Solid State Transformations in Weldments.** American Society for Metals Handbook. vol. 6. pág. 179 a 181 e 324 a 326. 1993, 2.873 p.

VOORT, G. F. V. **Microindentation Hardness Testing** - American Society for Metals Handbook. vol. 8. pág. 469 a 475. 2000, 2.235 p.

YASHWANT M., S. T. **Effect of chromium on the corrosion behavior of powder processed Fe 0,45 wt% P alloys.** Sahama. vol.35. part. 4, pág. 469 a 480. 2010.

APÊNDICE A – Cálculo das áreas das superfícies expostas ao meio.

1 Desenho esquemático do espécime.

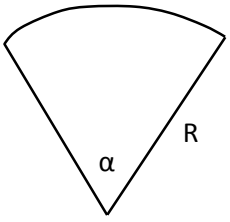


2 Área total de exposição (At).

At = 2A1 + A2 + A3 + A4 + A5

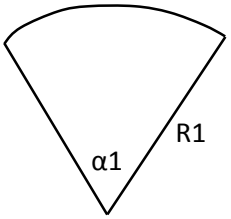
3 Determinação dos comprimentos L.

L1: segmento do arco interno



$L1 = \frac{\pi.R.\alpha}{180}$

L2: segmento do arco externo



$L2 = \frac{\pi.R1.\alpha1}{180}$

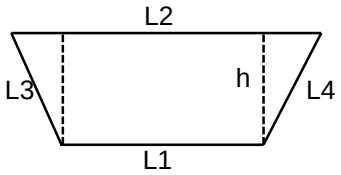
L3 = medição direta

L4 = medição direta

L5 = medição direta

4 Cálculo das áreas.

A1: área de um tetraedro.



h: medição direta

$A1 = \frac{(L1+L2).h}{2}$

A2 = L1.L5

A3 = L3.L5

A4 = L4.L5

A5 = L2.L5

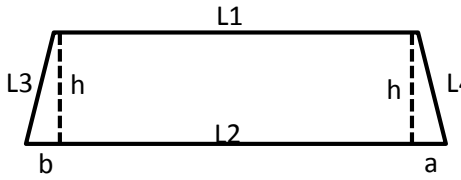
At = A1 + A2 + A3+ A4 + A5

5 Valores de comprimento obtidos para cada espécime.

5.1 Valores de L1 e L2 para os espécimes em arco.

	Espécime	alfa (graus)	R (mm)	L1 (mm)	alfa1 (graus)	R1 (mm)	L2 (mm)
Meio com fluxo	sem solda	50	62,20	54,25	52	84,15	76,33
	solda sem Tratamento	46	62,20	49,91	49	84,15	71,93
	solda com Tratamento	49	62,20	53,17	53	84,15	77,80
	solda com Passe de Revenimento	50	62,20	54,25	52,5	84,15	77,07
Meio sem fluxo	sem solda	50	62,00	54,08	50	84,00	73,27
	solda sem Tratamento	48	61,50	51,50	48	84,00	70,34
	solda com Tratamento	51	62,00	55,16	51	84,00	74,73
	solda com Passe de Revenimento	47	61,50	50,42	46	84,00	67,41

5.2 Valores de L3 e L4



h: medição direta

	Espécime	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	h (mm)
Meio com fluxo	sem solda	54,25	76,33	22,00	21,00	17,22
	solda sem Tratamento	49,91	71,93	22,00	22,00	19,05
	solda com Tratamento	53,17	77,80	21,50	22,00	18,52
	solda com Passe de Revenimento	54,25	77,07	21,50	22,00	19,09
Meio sem fluxo	sem solda	54,08	73,27	22,30	21,80	19,28
	solda sem Tratamento	51,50	70,34	22,20	21,70	19,26
	solda com Tratamento	55,16	74,73	21,60	21,30	18,74
	solda com Passe de Revenimento	50,42	67,41	22,20	21,70	19,68

5.3 Cálculo das áreas.

	Espécime	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	A1 (mm^2)	A2 (mm^2)	A3 (mm^2)	A4 (mm^2)	A5 (mm^2)
Meio com fluxo	sem solda	54,25	76,33	22,00	21,00	69,00	1124,59	3743,40	1518,00	1449,00	5267,00
	solda sem Tratamento	49,91	71,93	22,00	22,00	70,00	1160,39	3493,84	1540,00	1540,00	5035,07
	solda com Tratamento	53,17	77,80	21,50	22,00	70,00	1212,73	3721,70	1505,00	1540,00	5446,09
	solda com Passe de Revenimento	54,25	77,07	21,50	22,00	70,00	1253,59	3797,66	1505,00	1540,00	5394,72
Meio sem fluxo	sem solda	54,08	73,27	22,30	21,80	70,80	1227,79	3828,71	1578,84	1543,44	5187,28
	solda sem Tratamento	51,50	70,34	22,20	21,70	70,80	1173,07	3645,92	1571,76	1536,36	4979,79
	solda com Tratamento	55,16	74,73	21,60	21,30	69,70	1217,41	3844,61	1505,52	1484,61	5208,82
	solda com Passe de Revenimento	50,42	67,41	22,20	21,70	70,80	1159,58	3569,96	1571,76	1536,36	4772,30

5.4 Cálculo da área total de exposição de cada espécime.

	Espécime	Área total (mm^2)	Área total (cm^2)
Meio com fluxo	sem solda	14226,58	142,27
	solda sem Tratamento	13929,69	139,30
	solda com Tratamento	14638,26	146,38
	solda com Passe de Revenimento	14744,56	147,45
Meio sem fluxo	sem solda	14593,84	145,94
	solda sem Tratamento	14079,97	140,80
	solda com Tratamento	14478,37	144,78
	solda com Passe de Revenimento	13769,53	137,70

APÊNDICE B – Cálculo do intervalo de confiança das taxas de corrosão.

1 Variações aplicadas nas medidas e cálculo das áreas de exposição.

			arco interno			arco externo													
Meio	Variação	Espécime	alfa (graus)	R (mm)	L1 (mm)	alfa (graus)	R (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	h (mm)	L5 (mm)	A1 (mm^2)	A2 (mm^2)	A3 (mm^2)	A4 (mm^2)	A5 (mm^2)	Área total (mm^2)	Área total (cm^2)
Com fluxo	(-)	sem solda	49,000	62,10	53,08	51,00	84,05	74,78	21,90	20,90	17,21	68,90	1100,22	3657,33	1508,91	1440,01	5152,10	13958,79	139,59
	0		50,000	62,20	54,25	52,00	84,15	76,33	22,00	21,00	17,22	69,00	1124,34	3743,40	1518,00	1449,00	5267,00	14226,09	142,26
	(+)		51,000	62,30	55,43	53,00	84,25	77,89	22,10	21,10	17,23	69,10	1148,55	3829,95	1527,11	1458,01	5382,46	14494,64	144,95
	(-)	sem TT	45,000	62,10	48,75	48,00	84,05	70,38	21,90	21,90	19,04	69,90	1134,08	3407,52	1530,81	1530,81	4919,41	13656,72	136,57
	0		46,000	62,20	49,91	49,00	84,15	71,93	22,00	22,00	19,05	70,00	1160,54	3493,84	1540,00	1540,00	5035,07	13929,99	139,30
	(+)		47,000	62,30	51,08	50,00	84,25	73,48	22,10	22,10	19,06	70,10	1187,09	3580,64	1549,21	1549,21	5151,28	14204,53	142,05
	(-)	com TT	48,000	62,10	52,00	52,00	84,05	76,24	21,40	21,90	18,51	69,90	1186,87	3634,69	1495,86	1530,81	5329,36	14364,46	143,64
	0		49,000	62,20	53,17	53,00	84,15	77,80	21,50	22,00	18,52	70,00	1212,77	3721,70	1505,00	1540,00	5446,09	14638,33	146,38
	(+)		50,000	62,30	54,34	54,00	84,25	79,36	21,60	22,10	18,53	70,10	1238,76	3809,20	1514,16	1549,21	5563,38	14913,46	149,13
	(-)	com PR	49,000	62,10	53,08	51,50	84,05	75,51	21,40	21,90	18,99	69,90	1220,97	3710,41	1495,86	1530,81	5278,12	14457,15	144,57
	0		50,000	62,20	54,25	52,50	84,15	77,07	21,50	22,00	19,09	70,00	1253,45	3797,66	1505,00	1540,00	5394,72	14744,26	147,44
	(+)		51,000	62,30	55,43	53,50	84,25	78,63	21,60	22,10	19,19	70,10	1286,26	3885,38	1514,16	1549,21	5511,87	15033,13	150,33
Sem fluxo	(-)	sem solda	49,000	61,90	52,91	49,00	83,90	71,72	22,20	21,70	19,27	70,70	1200,78	3740,79	1569,54	1534,19	5070,31	14316,39	143,16
	0		50,000	62,00	54,08	50,00	84,00	73,27	22,30	21,80	19,28	70,80	1227,60	3828,71	1578,84	1543,44	5187,28	14593,47	145,93
	(+)		51,000	62,10	55,25	51,00	84,10	74,82	22,40	21,90	19,29	70,90	1254,52	3917,10	1588,16	1552,71	5304,81	14871,82	148,72
	(-)	sem TT	47,000	61,40	50,34	47,00	83,90	68,79	22,10	21,60	19,25	70,70	1146,62	3559,12	1562,47	1527,12	4863,36	13805,32	138,05
	0		48,000	61,50	51,50	48,00	84,00	70,34	22,20	21,70	19,26	70,80	1173,24	3645,92	1571,76	1536,36	4979,79	14080,31	140,80
	(+)		49,000	61,60	52,65	49,00	84,10	71,89	22,30	21,80	19,27	70,90	1199,95	3733,19	1581,07	1545,62	5096,77	14356,56	143,57
	(-)	com TT	50,000	61,90	53,99	50,00	83,90	73,18	21,50	21,20	18,73	69,60	1190,95	3757,74	1496,40	1475,52	5093,29	14204,85	142,05
	0		51,000	62,00	55,16	51,00	84,00	74,73	21,60	21,30	18,74	69,70	1217,08	3844,61	1505,52	1484,61	5208,82	14477,72	144,78
	(+)		52,000	62,10	56,33	52,00	84,10	76,29	21,70	21,40	18,75	69,80	1243,31	3931,95	1514,66	1493,72	5324,91	14751,85	147,52
	(-)	com PR	46,000	61,40	49,27	45,00	83,90	65,86	22,10	21,60	19,67	70,70	1132,32	3483,40	1562,47	1527,12	4656,41	13494,03	134,94
	0		47,000	61,50	50,42	46,00	84,00	67,41	22,20	21,70	19,68	70,80	1159,43	3569,96	1571,76	1536,36	4772,30	13769,24	137,69
	(+)		48,000	61,60	51,58	47,00	84,10	68,95	22,30	21,80	19,69	70,90	1186,64	3657,00	1581,07	1545,62	4888,74	14045,72	140,46

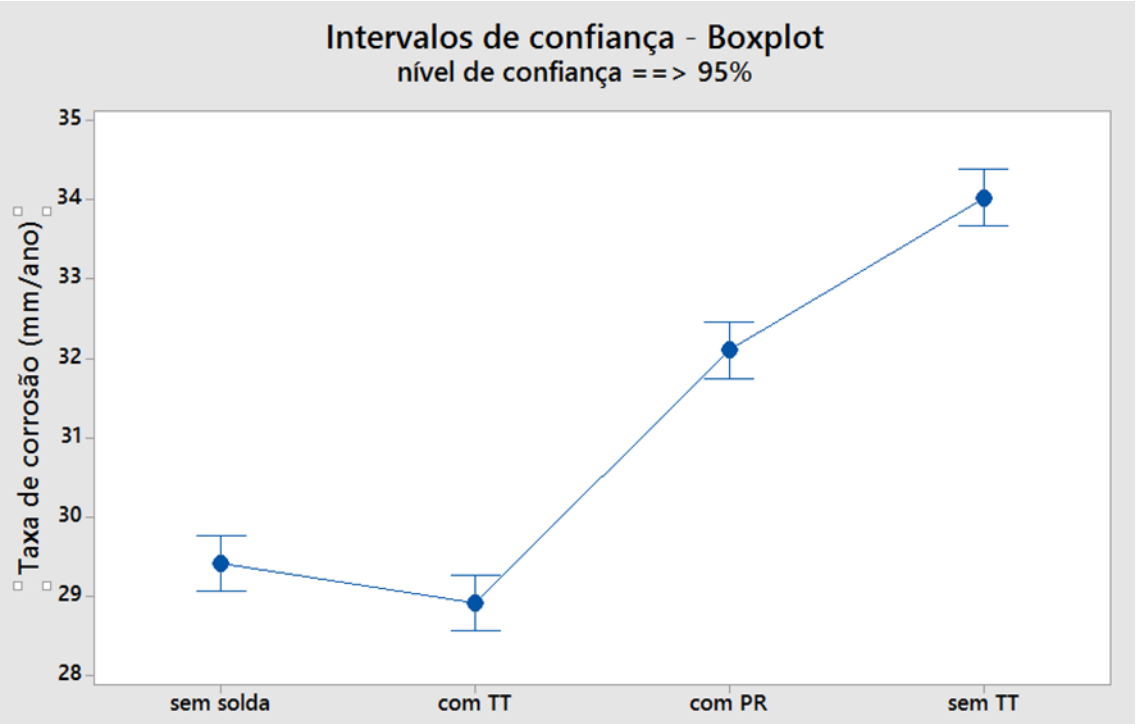
2 Cálculo do intervalo de Confiança para a taxa de corrosão no meio com fluxo.

Espécime	Taxa de Corrosão (mm/a)		
	Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança
Sem Solda	29,414	0,480	29,061 a 29,767
Com a Solda Tratada	28,911	0,470	28,558 a 29,264
Com a Solda Com Passe de Revenimento	32,100	0,543	31,747 a 32,453
Com a Solda Sem Tratamento	34,025	0,579	33,672 a 34,378

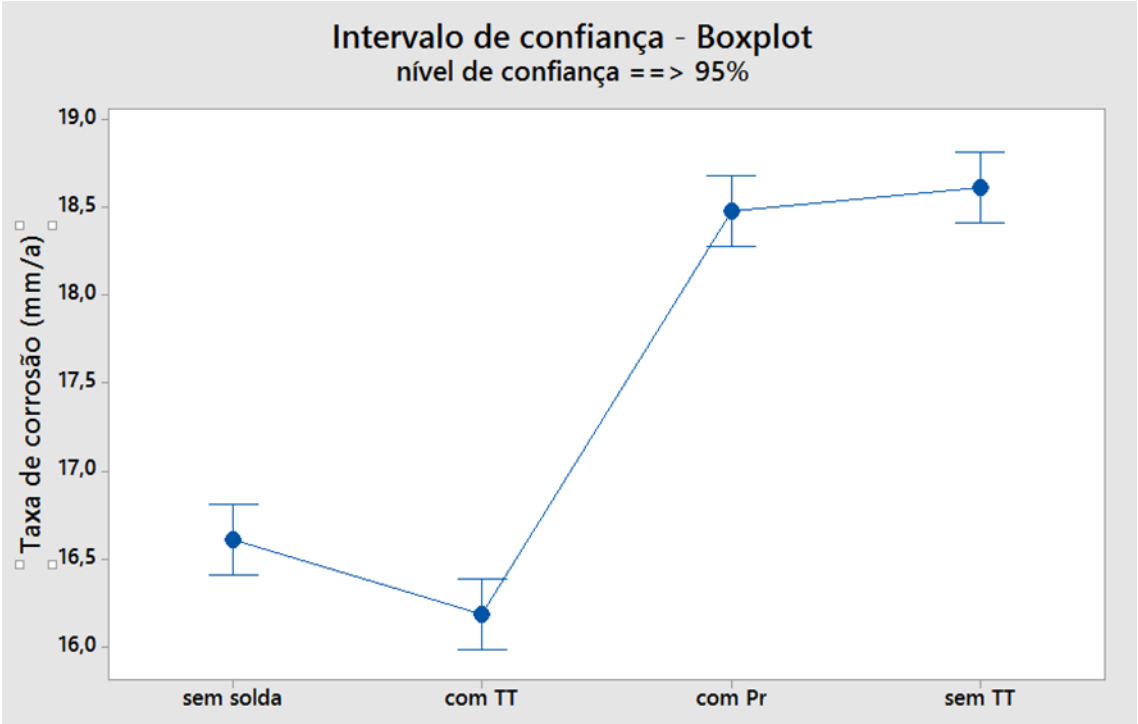
3 Cálculo do intervalo de Confiança para a taxa de corrosão no meio estagnado.

Espécime	Taxa de Corrosão (mm/a)		
	Média	Desvio Padão	Intervalo de confiança
Sem Solda	16,606	0,275	16,4055 a 16,8074
Com a Solda Tratada	16,181	0,265	15,9796 a 16,3815
Com a solda com Passe de Revenimento	18,483	0,323	18,282 a 18,684
Com a Solda sem tratamento	18,616	0,317	18,415 a 18,817

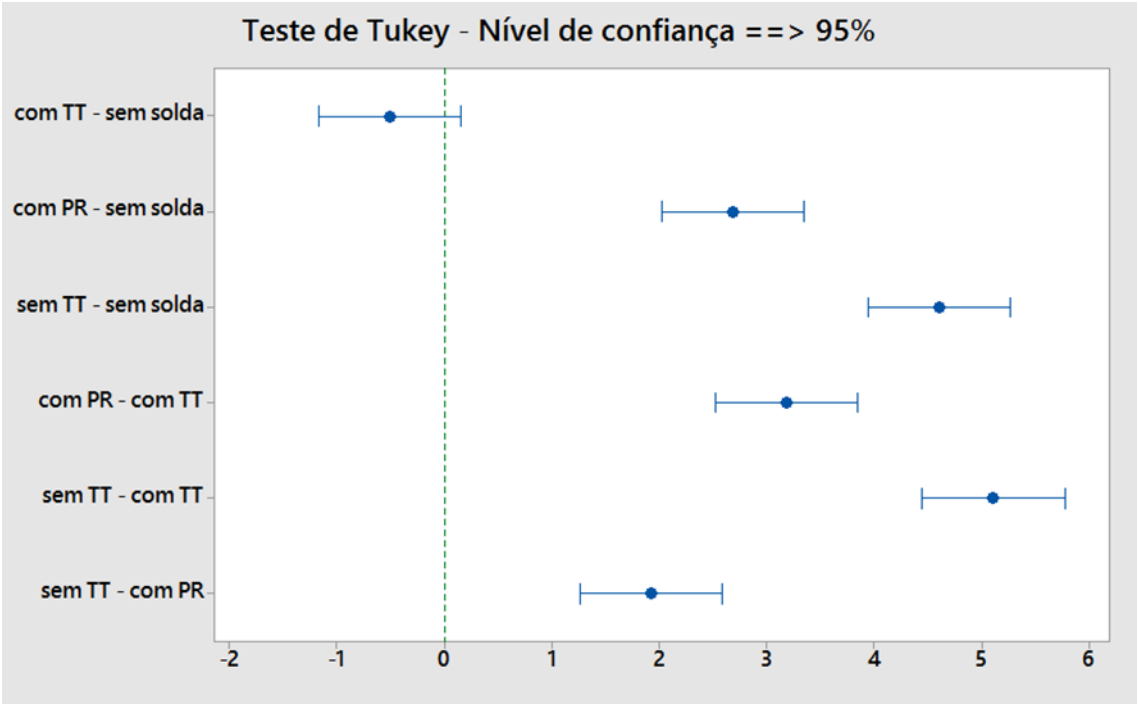
4 Intervalo de confiança de todos os espécimes no meio com fluxo.



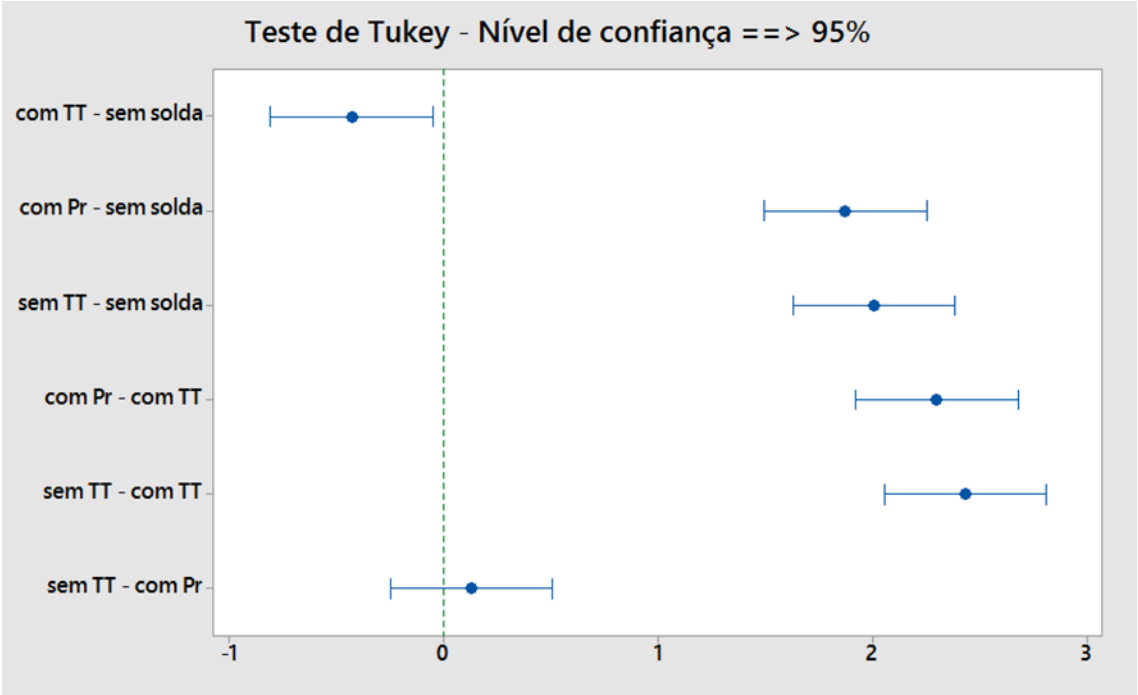
5 Intervalo de confiança de todos os espécimes no meio estagnado.



6 Comparação da taxa de corrosão dos espécimes, no meio com fluxo, através do teste de Tukey.



7 Comparação da taxa de corrosão dos espécimes, no meio estagnado, através do teste de Tukey.



ANEXO A – Análise química do metal base e solda com Passe de Revenimento.

SGS LABMAT

RELATÓRIO DE ENSAIO/ANÁLISE
Nº 003035-03892-15G-I-001-(S)
VIA ORIGINAL
"Laboratório pertencente à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios"

CRL 0406

Empresa Solicitante: INSPEBRAS SERVIÇOS EM MONTAGEM INDUSTRIAL LTDA. – ME
AV. PRESID. KENNEDY 5.922, VILA TUPI– CEP: 11704-100 – PRAIA GRANDE/SP

Informações fornecidas pelo solicitante:

Material: AÇO LIGA ASTM A335 P22
Amostra: JUNTA SOLDADA - "PR" - DIMENSÕES: 55 X 20 X 10mm
Documento: ND
Fornecedor Declarado: ---
Natureza do ensaio/análise: Químico

RESULTADOS DO ENSAIO

1. **Análise Química (% massa/massa):**

Metal base

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr
Obtido	0,116	0,21	0,42	0,014	0,005	2,17
*U	*± 0,01*	*± 0,02*	*± 0,02*	*± 0,004*	*± 0,004*	*± 0,02*

Elementos	Mo	Ni	Nb	Al	Cu	Co
Obtido	0,93	0,05	0,009	0,016	0,069	0,003
*U	*± 0,03*	*± 0,03*	*± 0,003*	*± 0,005*	*± 0,01*	*± 0,005*

Elementos	Ti	V	B	Pb	Sn	W
Obtido	0,001	0,008	ND	0,004	0,005	0,006
*U	*± 0,002*	*± 0,018*	*± 0,0015*	*NC*	*NC*	*± 0,008*

Elementos	Fe	***	***	***	***	***
Obtido	Base	***	***	***	***	***
*U	*NC*	***	***	***	***	***

Solda

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr
Obtido	0,092	0,37	0,90	0,026	0,016	2,42
*U	*± 0,01*	*± 0,02*	*± 0,02*	*± 0,004*	*± 0,004*	*± 0,02*

Elementos	Mo	Ni	Nb	Al	Cu	Co
Obtido	1,09	0,06	0,014	0,007	0,063	0,005
*U	*± 0,03*	*± 0,03*	*± 0,003*	*± 0,005*	*± 0,01*	*± 0,005*

Elementos	Ti	V	B	Pb	Sn	W
Obtido	0,009	0,019	0,0002	0,011	0,007	0,024
*U	*± 0,002*	*± 0,018*	*± 0,0015*	*NC*	*NC*	*± 0,008*

Elementos	Fe	***	***	***	***	***
Obtido	Base	***	***	***	***	***
*U	*NC*	***	***	***	***	***

Nota:
NA = Não analisado.
ND = Não detectado.
NC = Não considerado – Valor da incerteza não considerado devido à baixa concentração do elemento resultar em valores de incerteza próximos ao valor da concentração.

SGS LABMAT

RELATÓRIO DE ENSAIO/ANÁLISE
Nº 003035-03892-15G-I-001-(S)

VIA ORIGINAL

"Laboratório pertencente à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios"

CRL 0490

Norma Referencia: Norma ASTM A 751:2011
Condições Ambientais: Temperatura: 24,0°C Umidade: 40,0%
Equipamento: LSM-266-SP - Espectrômetro de Emissão Óptica - Calibração Interna conforme PO-15-SP - Validade: 30/04/2016
Procedimento de análises/ensaios: PO-15-SP Instrução de Operação para a Calibração do Espectrômetro Óptico GNR - rev.e
PT-20-SP Análise Química via Espectrometria de Emissão Óptica rev.D

Local do ensaio: LABORATORIO - GUARULHOS

*A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência *k*, o qual para uma distribuição *t* com graus de liberdade efetivos (*veff*) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Data do recebimento da amostra: 26/06/2015 **Data da conclusão do ensaio/análise:** 30/06/2015

Nota: Este relatório cancela e substitui o relatório nº003035-03892-15G-I-001.

GUARULHOS - SP, 2 de Julho de 2015

Eng Gustavo Santino Ceccato
Coordenador de Laboratório - Unidade Guarulhos
CREA 5060047976

Signatário Autorizado
Carimbo e Assinatura

Leandro Gusmão da Silva
Técnico de Laboratório

Carimbo e Assinatura

Os resultados apresentados no presente relatório têm significação restrita e se aplicam apenas às amostras ensaiadas/analisadas.
As amostragens enviadas para análise são realizadas pelo próprio cliente.
Este documento tem sua norma de autenticidade gravada. Este Relatório de Ensaio/Análise só deve ser reproduzido completo. Reprodução de partes requer aprovação escrita do Laboratório.
Este Relatório atende aos requisitos de Acreditação pela Cgcre/Inmetro, e qualquer escopo acreditado do laboratório.
A Cgcre é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a IA - European Cooperation for Accreditation.
The results presented in this report are limited, and apply only to the samples tested / analyzed.
The samples sent for analysis are responsibility of the customer.
This document is authentic. This Test Report / Analysis can only be reproduced completely. Reproduction of parts requires written approval of the laboratory.
This report meets the requirements of the Accreditation Cgcre / INMETRO, which assessed the competence of the laboratory.
Cgcre is a signatory to the ILAC Mutual Recognition Agreement - International Laboratory Accreditation Cooperation and Bilateral Mutual Recognition Agreement with IA - European Cooperation for Accreditation.

As informações contidas no presente relatório (ou certificado) são válidas e justas aos resultados de procedimentos de inspeção ou teste ou calibrações ou ensaios realizados em conformidade com as instruções do nosso cliente, após a nossa avaliação de tais resultados com base em quaisquer normas técnicas, práticas comerciais ou alternativas, ou outras circunstâncias que devemos, em nossa opinião profissional, serem consideradas. Os resultados acima refletem apenas aqueles que foram obtidos no local e na data da inspeção, teste ou calibração. Este relatório não Exime as obrigações e verdadeiros (ou suas responsabilidades contratuais, sem prejuízo o direito de reclamação do comprador contra o fornecedor ou vendedor para compensação de qualquer defeito não detectado durante nossa verificação ou exame depois, seja aparente ou oculto.
Este documento é emitido pela Companhia sob suas condições gerais de serviços acessível em http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm. Chamamos atenção para os itens de limitação de responsabilidade, indenização e jurisdição ali definidos. Qualquer alteração não autorizada, rasura ou falsificação do conteúdo ou aparência deste documento é ilegal e os responsáveis podem ser processados na extensão total da lei.
The information stated in this report (or certificate) is derived from the results of inspection or testing or calibration or assay procedures carried out in accordance with the instructions of our Client, and/or our assessment of such results on the basis of any technical standards, trade custom or practice, or other circumstances which should in our professional opinion be taken into account. The above reflects our findings at time and place of inspection, testing or calibration. This report does not release buyers or sellers from their contractual responsibilities nor does it prejudice buyer's right of claim toward seller/supplier for compensation for any apparent and/or hidden defects not detected during our inspection or assaying thereafter.
This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

Fim do Relatório

ANEXO B – Análise química da Solda sem tratamento.

SGS LABMAT	RELATÓRIO DE ENSAIO/ANÁLISE Nº 003035-03890-15G-I-001-(S) VIA ORIGINAL *"Laboratório pertencente à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios"*	CRL 0406

Empresa Solicitante: INSPEBRAS SERVIÇOS EM MONTAGEM INDUSTRIAL LTDA. – ME
AV. PRESID. KENNEDY 5.922, VILA TUPI– CEP: 11704-100 – PRAIA GRANDE/SP

Informações fornecidas pelo solicitante:

Material.....: AÇO LIGA ASTM A355 P22
Amostra.....: JUNTA SOLDADA - "ST" - DIMENSÕES: 55 X 20 X 10mm
Documento.....: ND
Fornecedor Declarado.....: ---
Natureza do ensaio/análise.....: Químico

RESULTADOS DO ENSAIO

1. **Análise Química (% massa/massa):**

Solda

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr
Obtido	0,094	0,37	0,88	0,026	0,016	2,45
*U	*± 0,01*	*± 0,02*	*± 0,02*	*± 0,004*	*± 0,004*	*± 0,02*

Elementos	Mo	Ni	Nb	Al	Cu	Co
Obtido	1,09	0,04	0,014	0,009	0,063	0,005
*U	*± 0,03*	*± 0,03*	*± 0,003*	*± 0,005*	*± 0,01*	*± 0,005*

Elementos	Ti	V	B	Pb	Sn	W
Obtido	0,008	0,019	0,0002	0,010	0,007	0,024
*U	*± 0,002*	*± 0,018*	*± 0,0015*	*NC*	*NC*	*± 0,008*

Elementos	Fe	***	***	***	***	***
Obtido	Base	***	***	***	***	***
*U	*NC*	***	***	***	***	***

Nota:
NA = Não analisado.
ND = Não detectado.
NC = Não considerado – Valor da incerteza não considerado devido à baixa concentração do elemento resultar em valores de incerteza próximos ao valor da concentração.

Norma Referencia: Norma ASTM A 751:2011
Condições Ambientais: Temperatura: 24,0°C Umidade: 40,0%
Equipamento: LBM-266-SP - Espectrômetro de Emissão Óptica - Calibração Interna conforme PO-15-SP - Validade: 30/04/2016
Procedimento de análises/ensaios: PO-15-SP Instrução de Operação para a Calibração do Espectrômetro Óptico GNR - rev.e
PT-20-SP Análise Química via Espectrometria de Emissão Óptica rev.D
Local do ensaio: LABORATORIO - GUARULHOS

*A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência *k*, o qual para uma distribuição *t* com graus de liberdade efetivos (*veff*) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Data do recebimento da amostra: 26/06/2015 **Data da conclusão do ensaio/análise:** 30/06/2015

SGS LABMAT ANÁLISES E ENSAIOS DE MATERIAIS LTDA.
MATRIZ: Rua João Leonardo Fustaino, 201 – Distrito Industrial Uninorte – Piracicaba/SP – CEP: 13413-102 Tel./ Fax: (19) 3917-1670/ 3433-1091
UNIDADE GRANDE SÃO PAULO: Rua Água, 208 – Itapegica – Guarulhos/SP – CEP: 07043-040 – Tel./Fax: (11) 2086-9090
www.grupolabmat.com.br sacilfgrupolabmat.com.br

ANEXO C – Análise química da Solda com tratamento.

SGS LABMAT

RELATÓRIO DE ENSAIO/ANÁLISE
Nº 003035-03891-15G-I-001-(S)
VIA ORIGINAL
"Laboratório pertencente à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios"

CRL 0406

Empresa Solicitante: INSPEBRAS SERVIÇOS EM MONTAGEM INDUSTRIAL LTDA. – ME
AV. PRESID. KENNEDY 5.922, VILA TUPI– CEP: 11704-100 – PRAIA GRANDE/SP

Informações fornecidas pelo solicitante:

Material: AÇO LIGA ASTM A335 P22
Amostra: JUNTA SOLDADA - "CT" - DIMENSÕES: 55 X 20 X 10mm
Documento: ND
Fornecedor Declarado: ---
Natureza do ensaio/análise: Químico

RESULTADOS DO ENSAIO

1. **Análise Química (% massa/massa):**

Solda

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr
Obtido	0,092	0,35	0,90	0,025	0,017	2,50
*U	*± 0,01*	*± 0,02*	*± 0,02*	*± 0,004*	*± 0,004*	*± 0,02*

Elementos	Mo	Ni	Nb	Al	Cu	Co
Obtido	1,10	0,08	0,013	0,008	0,073	0,005
*U	*± 0,03*	*± 0,03*	*± 0,003*	*± 0,005*	*± 0,01*	*± 0,005*

Elementos	Ti	V	B	Pb	Sn	W
Obtido	0,008	0,020	ND	0,010	0,006	0,024
*U	*± 0,002*	*± 0,018*	*± 0,0015*	*NC*	*NC*	*± 0,008*

Elementos	Fe	***	***	***	***	***
Obtido	Base	***	***	***	***	***
*U	*NC*	***	***	***	***	***

Nota:
NA = Não analisado.
ND = Não detectado.
NC = Não considerado – Valor da incerteza não considerado devido à baixa concentração do elemento resultar em valores de incerteza próximos ao valor da concentração.

Norma Referencia: Norma ASTM A 751:2011
Condições Ambientais: Temperatura: 24,0°C Umidade: 40,0%
Equipamento: LBM-266-SP - Espectrômetro de Emissão Óptica - Calibração Interna conforme PO-15-SP - Validade: 30/04/2016
Procedimento de análises/ensaios: PO-15-SP Instrução de Operação para a Calibração do Espectrômetro Óptico GNR - rev.e
PT-20-SP Análise Química via Espectrometria de Emissão Óptica rev.D
Local do ensaio: LABORATORIO - GUARULHOS

*A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência *k* , o qual para uma distribuição *t* com graus de liberdade efetivos (*veff*)corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Data do recebimento da amostra: 26/06/2015 **Data da conclusão do ensaio/análise:** 30/06/2015