

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

MARCELO YAMAGUTI

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, DUREZA E RESISTÊNCIA À
CORROSÃO DE CHAPAS DE AÇO ASTM A 131 DH 36 SOLDADAS POR
PROCESSOS MMA E TIG**

SANTOS/SP

2020

MARCELO YAMAGUTI

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, DUREZA E RESISTÊNCIA À
CORROSÃO DE CHAPAS DE AÇO ASTM A 131 DH 36 SOLDADAS POR
PROCESSOS MMA E TIG**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação da Prof^a. Dr^a. Emmanuelle Sá Freitas Feitosa.

SANTOS/SP

2020

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

671.52 Yamaguti, Marcelo.

Y18c Caracterização microestrutural, dureza e resistência à corrosão de chapas de aço ASTM A 131 DH 36 soldadas por processos MMA e TIG.

Marcelo Yamaguti

- 2020

- 94 p.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Emmanuelle Sá Freitas Feitosa

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2020.

1. ASTM A131 DH36. 2. Microestrutura. 3. Cinética da corrosão. 4. TIG. 5. MMA.

I.Feitosa, Emmanuelle Sá Freitas. II.Caracterização microestrutural, dureza e resistência à corrosão de chapas de aço ASTM A 131 DH 36 soldadas por processos MMA e TIG.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe por todo incentivo durante esta importante etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos à minha orientadora, Professora Doutora Emmanuelle Sá Freitas Feitosa, pelos ensinamentos, direcionamentos e comentários a respeito de todas as atividades desenvolvidas neste trabalho.

À Universidade Santa Cecília, por ter possibilitado a utilização dos laboratórios de Mecânica e Metalografia.

À Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Grupo de Pesquisa em Solidificação, por ter possibilitado a realização da caracterização microestrutural, através de utilização de microscopia ótica e eletrônica de varredura (MO e MEV), e ensaios de corrosão.

Ao Técnico de Laboratório de Metalografia Wilson Roberto de Oliveira, ao Técnico de Laboratório de Mecânica Sérgio Giangiulio, pelo auxílio na preparação dos corpos de prova utilizados nos ensaios deste trabalho, e às Secretárias Imaculada Scorza e Sandra Araujo da Universidade Santa Cecília, por todo o apoio durante a realização deste projeto.

À empresa Metalock do Brasil, por ter disponibilizado materiais, consumíveis e soldador para a fabricação dos corpos de prova.

RESUMO

A indústria naval faz extenso uso de aços de alta resistência na fabricação de elementos estruturais de navio, e entre estes aços, um dos mais utilizados é o ASTM A 131 DH36, que alia boas propriedades mecânicas e reduzida espessura de chapa. A redução na espessura das chapas gera estruturas mais leves, mantendo a resistência aos intensos esforços mecânicos aos quais estes componentes são submetidos, além do que a utilização de chapas mais finas e leves reduz o consumo de combustível, gerando mais economia nas operações. A principal forma de união dos componentes estruturais é a soldagem em seus vários processos, como por exemplo, Arco Submerso, Arame Tubular, Eletrodo Revestido e TIG. Cada processo possui características particulares de aplicação e gera microestruturas que variam em função dos consumíveis utilizados, aporte térmico e ciclo térmico, por exemplo. Estas microestruturas podem afetar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão do cordão de solda. A escassez de trabalhos direcionados à correlacionar microestrutura e cinética de corrosão em corpos soldados por eletrodo revestido e TIG motivou a elaboração desta dissertação. O objetivo deste trabalho foi analisar dois processos de soldagem (MMA – *Manual Metal Arc*, e TIG – *Tungsten Inert Gas*) aplicados em soldagem de chapas de aço ASTM A131 DH 36, caracterizar as microestruturas formadas na zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS), e correlacionar estas microestruturas quanto à sua resistência à corrosão. A caracterização microestrutural foi realizada por meio de observações ao microscópio óptico (MO) e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para o estudo de resistência à corrosão foram realizados ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e Polarização Potenciodinâmica (Polarização Linear), com célula montada com solução de 0,5 M NaCl para simular água do mar. Foi observado que as heterogeneidades formadas principalmente na zona termicamente afetada (ZTA) interferem drasticamente na cinética de corrosão, quando comparadas às cinéticas de corrosão do metal de base e cordão de solda nos corpos de provas soldados pelos dois processos. Esta alteração na cinética de corrosão pode ser observada nos diagramas de *nyquist*, nos quais os arcos capacitivos denotam a variação de resistência à corrosão em função das microestruturas presentes nas áreas ensaiadas.

Palavras Chave: ASTM A131 DH 36, microestrutura, cinética da corrosão, TIG, MMA.

ABSTRACT

The marine industry makes extensive use of high strength steels in the manufacture of ship structural elements, and among these steels, one of the most widely used is ASTM A 131 DH36, which combines good mechanical properties and reduced steel plate thickness, generating lighter structures and maintaining resistance to the intense mechanical stresses to which these components are submitted, in addition, the use of thinner and lighter steel plates reduces fuel consumption, generating more economy in operations. The main way of union of structural components is welding, in its various processes, such as Submerged Arc Welding, Fluxcored Arc Welding, Shielded Metal Arc Welding and Gas Tungsten Arc Welding. Each process has particular application characteristics and generates microstructures that will be modified depending on the consumables used, heat input and thermal cycle for example. These microstructures may affect the corrosion resistance of the weld bead. The scarcity of studies directed to correlate microstructure and corrosion kinetics in test specimen welded by Shielded Metal Arc Welding and Gas Tungsten Arc Welding motivated the elaboration of this dissertation. The objective of this work was to analyze two welding processes (MMA – Manual Metal Arc, and TIG – Tungsten Inert Gas) when applied to the welding of ASTM A131 DH 36 steel plates for the microstructures formed in the heat affected zone (HAZ) and fusion zone (FZ), and to correlate these microstructures to its corrosion resistance. The microstructural characterization was performed by optical microscope (MO) and scanning electron microscope (SEM) observations, and for the study of corrosion resistance, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Potentiodynamic Polarization (Linear Polarization) tests were performed with cell mounted with 0.5 M NaCl solution to simulate seawater. It was observed that the heterogeneities formed mainly in the heat affected zone (HAZ) interfere drastically in the corrosion kinetics, when compared to the corrosion kinetics of the base metal and fusion zone in the welded test specimens by both processes. This change in corrosion kinetics can be observed in *nyquist* diagrams, where capacitive arcs denote the corrosion resistance variation as a function of the microstructures present in the tested areas.

Keywords: ASTM A131 DH 36, microstructure, corrosion kinetics, TIG, MMA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seção típica de casco duplo fundo de navio. Fonte: Fugarra (2006)	265
Figura 2: Painel de fundo de navio de carga geral: (1) quilha; (2) chapeamento; (3) hastilha; (4) longitudinal leve; (5) antepara transversal e (6) antepara longitudinal. Fonte: Fugarra (2006).	265
Figura 3: Corrosão de fresta em junta soldada de reforço: chapa do deck (Deck plating); solda de filete (Fillet weld); longitudinal. Fonte: DNV (2013).....	287
Figura 4: Corrosão de borda em longitudinal sob deck. Fonte: DNV (2013)	287
Figura 5: (a) Exemplo de corrosão- tanque de lastro- localização no deck e (b) detalhamento da trinca aparente no tanque de lastro.Fonte: autor (2019)	298
Figura 6: (a) Exemplo de corrosão por fresta em costado de navio e (b) detalhe de corrosão por fresta na junta soldada. Fonte: autor (2019)	298
Figura 7: (a) Exemplo de reparos em casco- colisão e (b) imagem interna de reparos em casco- colisão. Fonte: autor (2019).....	309
Figura 8: Esquema básico de ligação do processo MMA. Fonte: Wainer et al. (1992)	3Erro! Indicador não definido.
Figura 9: Modo de transferência de metal Fonte: Okumura <i>et al</i> (1982).	333
Figura 10: Modo de transferência (a) alta corrente e por glóbulos pequenos (b) baixa corrente e glóbulos grandes. Fonte: Okumura <i>et al</i> (1982).....	33
Figura 11: Esquema básico de ligação do processo TIG Fonte: Okumura <i>et al</i> (1982)	354
Figura 12: Modo de transferência de metal no processo TIG Fonte: Wainer <i>et al</i> (1992)	365
Figura 13: Transferência por curto circuito (a), globular (b) e spray (c). Fonte: Chen <i>et al</i> (2016)	376
Figura 14: Fluxograma das etapas seguidas para a execução dos procedimentos experimentais da pesquisa Fonte: autor (2019).....	38
Figura 15: (a) Chapas para corpos de prova após usinagem dos chanfros e (b) Chapas travadas para a realização dos processos de soldagem. Fonte: autor (2019)	40
Figura 16: Soldagem por processo MMA. Fonte: adaptado internet (2019)	40

Figura 17: Chapas soldadas pelo processo MMA para confecção dos corpos de prova. Fonte: autor (2019).....	41
Figura 18: Soldagem por processo TIG. Fonte: adaptado internet (2019).....	42
Figura 19: Corpo de prova durante soldagem TIG. Fonte: autor (2019).....	42
Figura 20: Chapas soldadas pelo processo TIG para confecção dos corpos de prova. Fonte: autor (2019).....	44
Figura 21: (a) Corpos de prova cortados em serra e (b) Superfícies retificadas. Fonte: autor (2019).....	45
Figura 22: Mapeamento de corpo de prova, indicando a localização das endentações.....	47
Figura 23: (a) corpo de prova montado na célula de ensaio, (b) célula montada e conectada aos eletrodos. Fonte: autor (2019)	50
Figura 24: Regiões estudadas para correlação entre microestrutura e resistência à corrosão. Fonte: autor (2019).....	52
Figura 25: Qualidade das soldas por líquido penetrante: (a) superfícies com aplicação do líquido penetrante; (b) superfícies com aplicação do pó revelador. Fonte: autor (2019).....	53
Figura 26: Mapa de endentações de ensaios de dureza em corpo de prova MMA. Fonte: adaptado laboratório Tork (2019).....	56
Figura 27: Distribuição de dureza em corpo de prova MMA, dureza vickers (HV). Fonte: autor (2019).....	57
Figura 28: Mapa de endentações de ensaios de dureza em corpo de prova TIG. Fonte: adaptado laboratório Tork (2019).....	58
Figura 29: Distribuição de dureza em corpo de prova TIG (Vickers HV). Fonte: autor (2019).....	59
Figura 30: Distribuição comparativa de dureza em corpos de prova MMA e TIG Vickers (HV). Fonte: autor (2019)	60
Figura 31: Distribuição comparativa de dureza em corpos de prova MMA e TIG Dureza Rockwell B. Fonte: autor (2019).	61
Figura 32: Macrografias dos Corpos de prova de solda após ataque com Nital 5%: (a) Processo MMA e (b) Processo TIG. Fonte: autor (2019)	63
Figura 33: Micrografias do metal de base: MO (a, c) e MEV (b, d) Fonte: autor (2019).	64

Figura 34: Micrografias do cordão de solda: MO (a, c) e MEV (b, d). Fonte: autor (2019).....	66
Figura 35: Micrografias da ZTA: MO (a, c, e) e MEV (b, d, f). Fonte: autor (2019)....	68
Figura 36: Micrografias da metal de base: MO (a, c) e MEV (b, d). Fonte: autor (2019).....	69
Figura 37: Micrografias de metal de solda: MO (a, c) e MEV (b, d). Fonte: autor (2019).....	70
Figura 38: Micrografias da ZTA: MO (a, c, e) e MEV (b, d, f).Fonte: autor (2019).....	72
Figura 39: (a) Curva de impedância x frequência para corpo de prova soldado pelo processo MMA e (b) Diagramas de Nyquist para corpo de prova soldado pelo processo MMA. Fonte: autor (2019).....	75
Figura 40: Curvas de polarização potenciodinâmica para as regiões MB, ZTA e CS para corpo de prova soldado pelo processo MMA (a) e em (b) as curvas com aumento das escalas. Fonte: autor (2019).....	77
Figura 41: (a) Curva de impedância x frequência para corpo de prova soldado pelo processo MMA e (b) Diagramas de Nyquist para corpo de prova soldado pelo processo TIG.Fonte: autor (2019).....	78
Figura 42: Curvas de polarização potenciodinâmica para as regiões MB, ZTA e CS para corpo de prova soldado pelo processo TIG (a) e em (b) as curvas com aumento das escalas. Fonte: autor (2019).....	80
Figura 43: Comparação entre os diagramas de <i>Nyquist</i> na ZTA para corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG na ZTA. Fonte: autor (2019).....	81
Figura 44: Comparação entre as curvas de impedância x frequência na ZTA para corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG. Fonte: autor (2019).....	82
Figura 45: Comparação entre as curvas de polarização potenciodinâmica para a região ZTA para corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG. Fonte: autor (2019).	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do aço ASTM 131 DH 36	398
Tabela 2: Parâmetros de Soldagem MMA	41
Tabela 3: Parâmetros de Soldagem TIG.....	43
Tabela 4: Resultados do ensaio de rugosidade ($R_a \mu m$).....	55
Tabela 5: Resultados do ensaio de dureza em corpo de prova MMA (Vickers HV) ..	56
Tabela 6: Resultados do ensaio de dureza em corpo de prova TIG (Vickers HV).....	57
Tabela 7: Resultados do ensaio de dureza complementar (Rockwell B).....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	–	<i>American Bureau of Shipping</i>
AC	–	<i>Alternating current</i>
ARBL	–	Alta resistência e Baixa Liga
ASTM	–	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	–	<i>American Welding Society</i>
BV	–	<i>Bureau Veritas</i>
cc	–	Centímetro Cúbico
CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Contínua
CS	–	Cordão de Solda
DNV	–	<i>Det Norske Veritas</i>
END	–	Ensaio Não destrutivo
g	–	Gramas
gf	–	Gramas força
GMAW	–	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
gPa	–	Giga Pascal
GTAW	–	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HSLA	–	<i>High Strength Low Alloy</i>
Hz	–	Hertz
IGG	–	<i>Inert Gas Generator</i>
J	–	Joule
KHz	–	Kilohertz
KVA	–	Kilovoltampere
LR	–	<i>Lloyds Register</i>
MAG	–	<i>Metal Active Gas</i>
MB	–	Metal de Base
mV	–	Milivolt
MEV	–	Microscópio Eletrônico de Varredura
MIG	–	<i>Metal Inert Gas</i>
mm	–	Milímetro
MPa	–	Mega Pascal
MMA	–	<i>Manual Metal Arc</i>

MS	–	Metal de Solda
NKK	–	<i>Nippon Kaiji Kyokai</i>
pH	–	Potencial Hidrogeniônico
s	–	Segundo
SAW	–	<i>Submerged Arc Welding</i>
SMAW	–	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
V	–	Volts
TIG	–	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UNICAMP	–	Universidade Estadual de Campinas
ZF	–	Zona de Fuzão
ZTA	–	Zona Térmicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag	–	Prata
AgCl	–	Cloreto de Prata
C	–	Carbono
°C	–	Graus Célsius
CO ₂	–	Dióxido de Carbono
Cr	–	Cromo
Cu	–	Cobre
E _{corr}	–	Potencial de corrosão
Fe	–	Ferro
H ₂ S	–	Sulfeto de Hidrogênio
i _{corr}	–	Taxa de corrosão
M	–	Molar
Mn	–	Manganês
Mo	–	Molibdênio
NaCl	–	Cloreto de Sódio
Nb	–	Nióbio
Ni	–	Níquel
P	–	Fósforo
S	–	Enxofre
Si	–	Silício
SO ₂	–	Dióxido de Enxofre
SO ₃	–	Trióxido de Enxofre
V	–	Vanádio
W	–	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivo	Erro! Indicador não definido. 9
1.1.1	Objetivo Geral	Erro! Indicador não definido. 9
1.1.2	Objetivos Específicos	Erro!
	Indicador não definido. 9	
1.2	Jusitficativa e Relevância do Tema	19
1.3	Fundamentação Teórica	23
1.3.1	Processos de Soldagem na Indústria Naval	30
1.3.2	Metalurgia da soldagem	31
1.3.3	Processo de Soldagem MMA (Manual Metal Arc)	32
1.3.3	Processo de Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas)	35
2	MATERIAIS E METODOS	37
2.1	Fabricação dos corpos de prova: processos de soldagem	39
2.1.1	Processo de soldagem MMA (Manual Metal Arc)	40
2.1.2	Processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas)	42
2.2	Avaliação da qualidade da solda: ensao não destrutivo	45
2.3	Preparação dos corpos de prova para: caracterização microestrutural, ensaios de dureza, corrosão eletroquímica	45
2.4	Ensaio de dureza e rugosidadde	47
2.5	Caracterização microestrutural dos corpos de prova soldados	48
2.6	Ensaio de corrosão: espectroscopia de impedância eletroquímica e polarização linear	49
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
3.1	Caracterização da integridade dos cordões de solda	53
3.2	Rugosidade	55
3.3	Dureza: MMA e TIG	55
3.4	Caracterização Macro e Microestrutural dos corpos de prova soldados	62
3.4.1	Microestrutura das chapas soldadas MMA e TIG	62
3.4.2	TIG – microestrutura do metal de base	63
3.4.3	TIG – microestrutura do cordão de solda	65
3.4.4	TIG – microestrutura da zona termicamente afetada	67
3.4.5	MMA – microestrutura do metal base	69
3.4.6	MMA – microestrutura do cordão de solda	71
3.4.7	MMA – microestrutura da zona termicamente afetada	72
3.5	Ensaio de corrosão eletroquímica de chapas soldadas por MMA e TIG	74
3.5.1	Ensaio Eletroquímicos: Espectroscopia de impedância eletroquímica e Polarização para o processo MMA	74
3.5.2	Ensaio Eletroquímicos: Espectroscopia de impedância eletroquímica e Polarização para o processo TIG	78
3.5.3	Análise comparativa na ZTA dos corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG	81
4	CONCLUSÕES	84
4.1	Trabalhos futuros	86

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO A – Certificado de usina – chapa ASTM A 131 DH36.....	90
ANEXO B – Certificado arame TIG.....	91
ANEXO C – Certificado eletrodo revestido	92
ANEXO D – Relatório original de ensaiode dureza Vickers.....	93

1 INTRODUÇÃO

Estruturas navais, tais como cascos de navios, são construídas a partir de elementos básicos, os *blanks*, que serão unidos para formarem estruturas maiores, os painéis, que por sua vez serão unidos em estruturas maiores, os blocos e sub-blocos, e finalmente estes por sua vez serão edificados no dique seco do estaleiro para formar o casco e superestrutura do navio. Ao longo deste processo de fabricação, o principal método empregado para a união destes módulos é a soldagem.

Dentre os aços utilizados em estruturas navais, os mais utilizados atualmente são os aços de Alta Resistência e de Baixa Liga (ARBL), tal como o ASTM A 131 DH 36, que estão substituindo os aços estruturais (CHUJUTALLI, 2017). Hayat *et al.* (2011) direcionaram seus estudos para as características combinadas de boa resistência e ductilidade do DH 36, características estas que garantem boas propriedades mecânicas com redução considerável de espessura de chapa. A redução na espessura das chapas se traduz em estruturas mais leves e resistentes, proporcionando embarcações com menor peso morto e maior capacidade de carga, gerando maior eficiência energética dos propulsores, ou seja, menor consumo de combustível fóssil e redução de CO_x e NO_x na atmosfera.

O casco do navio é submetido a intensas solicitações mecânicas quando em navegação. Estes esforços mecânicos devem ser suportados pela estrutura do casco, que é composta de elementos (cavernas, vaus, sicordas, longarinas, entre outros) unidos por processos de soldagem. Os processos de soldagem devem assegurar as propriedades mecânicas adequadas para que estas estruturas suportem as solicitações mecânicas e possíveis impactos aos quais são submetidos.

O conhecimento das microestruturas formadas na soldagem, bem como a correlação destas com as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão são importantes para que possam ser elaborados e planejados reparos na estrutura do casco ou em elementos estruturais do navio quando necessário. A comparação entre dois processos de soldagem quanto às microestruturas formadas e resistência à corrosão fornece indicativos sobre o comportamento das juntas soldadas quando submetidas a solicitações mecânicas inerentes às cargas aplicadas às estruturas quando o navio estiver operando. O aporte térmico e a taxa de resfriamento

inerentes a cada processo geram microestruturas e fases que irão interferir nas propriedades mecânicas e na cinética da corrosão. Como exemplo de medida de contenção, é possível citar a especificação de temperaturas de pré e pós-aquecimento na elaboração do procedimento de soldagem, para prevenir a ocorrência de microestruturas frágeis ou trincas no cordão e zona termicamente afetada.

Na construção naval, o volume de solda empregado na união dos elementos estruturais é muito grande, podendo alcançar 1/3 dos trabalhos de construção (Okumura *et al.* 1982). A qualidade da solda influencia diretamente a estanqueidade à água e ao óleo, além das propriedades estruturais já citadas. Nos estaleiros este grande volume de trabalhos de soldagem é executado, principalmente, por processos automatizados (arco submerso, arame tubular MIG-MAG entre outros), visando redução de tempo e qualidade do cordão de solda. No entanto, na fabricação e edificação dos grandes blocos, que normalmente pesam algumas centenas de toneladas, e que possuem geometrias complexas, além dos processos automatizados, também são empregados processos manuais, nos quais o soldador executa manualmente a solda em diversas posições, além da plana, como a vertical, horizontal e sobre cabeça. Durante reparos estruturais, na maioria dos casos não é possível aplicar equipamentos automatizados devido à localização do dano, geometria complexa e à sua extensão. Desta forma, os processos comumente utilizados são manuais operados por soldadores classificados e certificados, utilizando os processos por eletrodo revestido para estruturas e TIG para tubulações.

Os reparos estruturais são aplicados quando ocorrem danos provenientes de colisões, por exemplo, fadiga do material ou corrosão acentuada devido à perda da proteção superficial e contato com água do mar. Os reparos seguem os procedimentos estabelecidos pelas sociedades classificadoras e manuais técnicos das embarcações. Após o reparo, a área deve apresentar no mínimo as mesmas características de resistência a esforços mecânicos e à corrosão, características estas asseguradas pelo adequado processo de soldagem empregado.

Para a reconstrução de partes avariadas, reconstrução de equipamentos (vasos de pressão, caldeiras e tubulações) e execução de reparos estruturais se faz uso extensivamente de processos de soldagem, assim como nos estaleiros durante a fase de construção. Nos estaleiros utilizam-se processos automatizados para as soldas mais extensas e feitas em linha reta e plana, mas na fase de edificação e

montagem, devido à complexidade de geometrias envolvidas, os processos manuais ainda são muito utilizados, assim como nos tipos de reparos citados, onde devido a dificuldades de acesso e posições de trabalho variadas, os processos automatizados nem sempre são viáveis. Desta forma, neste trabalho de pesquisa se avaliam as características microestruturais dos processos de soldagem MMA e TIG, bem como suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão nas diferentes regiões da solda (metal de base, zona termicamente afetada e cordão de solda).

1.1- Objetivo

1.1.1- Objetivo geral

Mediante utilização de corpos de prova fabricados com chapas de aço ASTM A 131 DH36, amplamente empregados na construção naval, este trabalho tem por objetivo geral comparar dois processos de soldagem (MMA e TIG), a partir da verificação e correlações de suas características microestruturais, propriedades mecânicas e resistência à corrosão.

1.1.2- Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral foram elencadas as seguintes metas:

Soldar as chapas devidamente preparadas para soldagem por processos (MMA e TIG);

Caracterizar metalograficamente o aço ASTM A 131 DH36 após soldagem de chapas nas regiões: Metal Base (MB), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Cordão de Solda (CS);

Avaliar o perfil de dureza das chapas soldadas pelos processos TIG e MMA nas regiões MB, ZTA e CS;

Avaliar a resistência à corrosão de chapas soldadas pelos processos TIG e MMA nas regiões MB, ZTA e CS a partir de ensaios eletroquímicos.

1.2- Justificativa e relevância do tema

Este trabalho teve por motivações o estudo sobre o comportamento quanto à corrosão em juntas soldadas nos reparos realizados em estruturas navais,

realizados por meio de dois processos de soldagem manuais (MMA e TIG), e a escassez de dados na literatura quanto à correlação das microestruturas formadas e suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão, e o fato de estes dois processos de soldagem serem amplamente empregados tanto na construção quanto nas operações de reparos navais. Hayat *et al.* (2011) em seu trabalho já mencionava a falta de estudos na literatura relacionados a estas correlações, como as taxas de deformação em relação a variação de temperatura durante operações de soldagem.

Wang (2009) em seu trabalho dedicado ao estudo do mecanismo de corrosão em aços estruturais de alta tensão, verificou o efeito da concentração de 3,5% de NaCl em solução aquosa e em presença de amônia nitrogenada, em corpos de prova fabricados em aços A 3 e DH 36 no comportamento da corrosão. Os ensaios de corrosão utilizados foram à espectroscopia de impedância eletroquímica e polarização potenciodinâmica. No entanto, seus estudos foram realizados em corpos de prova cilíndricos, e não contemplaram o ensaio em juntas soldadas.

No trabalho de Heyer *et al.* (2013) foram realizados estudos sobre corrosão influenciada por micro-organismos em tanques de lastro fabricados em aço estrutural de alta tensão; no entanto não foram realizados estudos específicos para averiguar os mecanismos de corrosão em elementos soldados. Seu trabalho discorre sobre o processo de corrosão devido à formação de biofilme sobre a superfície da chapa de aço, nas áreas totalmente e parcialmente submersas em água salgada no interior do tanque de lastro. Os micro-organismos modificam os processos de corrosão devido às alterações eletroquímicas provocadas na interface metal-solução. O biofilme formado cria nichos anaeróbicos que irão causar corrosão por *pitting* devido à produção de sulfeto de hidrogênio, que é corrosivo e provoca as trincas induzidas por H₂S. Para evitar este problema, os autores sugerem utilização de revestimentos (base epoxy), anodos de sacrifício e sistemas de tratamento de água de lastro.

Ainda em seu trabalho, Heyer *et al.* (2013) chamam a atenção para a necessidade de estudos sobre este mecanismo de corrosão para que se possam adotar medidas preventivas que evitariam ou diminuiriam os efeitos deletérios da corrosão nas áreas afetadas, e conseqüentemente os gastos com reparos em áreas extensas e críticas para o bom funcionamento da embarcação, atingidas por corrosão e com diminuição de espessura de chapa a níveis críticos, e que necessitariam de grandes intervenções, acarretando dispendiosos gastos com manutenções e materiais, além da parada de operação da embarcação.

Outra forma de corrosão foi estudada por Aung (2007) em seu trabalho. Durante a fase de fabricação do navio (fabricação de painéis, sub-blocos, blocos e edificação), há a tendência de acúmulo de tensões inerentes aos processos de soldagem empregados, o que pode levar a corrosão sob tensão quando estas superfícies forem expostas ao ambiente marinho durante a operação da embarcação. No entanto, não foi descrita a correlação entre a microestrutura formada após a soldagem pelos processos empregados neste trabalho e a resistência a corrosão e suas propriedades mecânicas.

Fowler *et al.* (2015) realizaram estudos sobre a microestrutura e microdureza em corpos de prova fabricados com aço de alta tensão DH36 soldados por fricção. Apesar de ser um processo de soldagem diferente dos processos utilizados em construção naval, foi relevante notar em seu trabalho que, no metal base, foram observadas a presença de Ferrita bandeada e Perlita. Na zona termicamente afetada foram observados grãos de Ferrita com tamanho aproximado aos encontrados no metal base, e Perlita parcialmente degenerada devido ao aporte térmico (*heat input*). Ainda segundo Fowler *et al.* (2015), quando comparados os tamanhos de grãos encontrados na zona termicamente afetada e no metal base, pode ser verificado que o aporte térmico do processo de soldagem por fricção não influenciou no crescimento de grão. Estas microestruturas formadas fornecem um indicativo de propriedades mecânicas das juntas soldadas pelo processo utilizado. Apesar das características do processo de soldagem por fricção serem muito diferentes dos processos de soldagem empregados em construção naval, normalmente com emprego de arco elétrico e gases de proteção, as características da microestrutura podem ser comparadas e analisadas com relação ao mecanismo de solidificação na formação das microestruturas deste aço.

Li *et al.* (2016) realizaram trabalhos em juntas soldadas de tubos fabricados em DH 36, visando determinar o comportamento destas juntas quanto a resistência à corrosão e propriedades mecânicas após o alívio de tensões por vibração. Em seu trabalho foi feita a comparação entre este método e o alívio de tensões por tratamento térmico convencional. Em seus experimentos foram utilizados os processos GMAW (para passe de raiz) e SAW (passes de enchimento e acabamento). Apesar dos processos empregados serem diferentes dos utilizados neste trabalho, é interessante notar o comportamento do aço DH 36 quando submetido aos dois processos descritos no experimento. Os autores chamam a

atenção para o cuidado a ser tomado quando utilizado o método convencional (térmico) de alívio de tensões para não se alcançar a temperatura crítica, o que acarretaria a transformação de fase e alteração da microestrutura e consequente alteração na sua resistência a corrosão e propriedades mecânicas.

O trabalho realizado por Cheng *et al.* (2015) foca em experimentos com corpos de prova fabricados em aço DH36, e expostos à ambiente que simula a água do mar, e leva em consideração, entre outros fatores (oxigênio dissolvido, salinidade, Ph, etc.) a temperatura. Em seu trabalho, foi feita a avaliação do comportamento da corrosão em corpos de prova imersos sob influência da temperatura (20, 25 e 30)°C. Após 366 horas de imersão, as amostras foram observadas em MEV, e os resultados mostraram diferentes produtos de corrosão. A (20 e 25)°C foi observada corrosão na forma de pellets. A 30°C foi observada corrosão na forma de camada. Os resultados demonstram que a temperatura tem grande influência na corrosão do DH36, no entanto seus resultados baseiam-se apenas na análise da morfologia da corrosão externa ocorrida nos corpos de prova e a perda de massa, mas não faz correlações entre o mecanismo de corrosão e a microestrutura do aço.

Polezhayeva *et al.* (2015) realizaram estudo sobre fadiga em corpos de prova fabricados em aço DH36 e soldados por processo de fricção. Foram empregadas velocidades de soldagem diferentes e as propriedades mecânicas e microestrutura foram analisadas. Nos corpos de prova soldados de forma mais lenta foi encontrada microestrutura homogênea com significativo refinamento de grãos. Estas características podem ser atribuídas a menor taxa de resfriamento quando a soldagem é processada de forma mais lenta. Quando a velocidade é aumentada, a taxa de resfriamento aumenta proporcionalmente, ocasionando a geração de fases mais duras, como a bainita, que aumentaram a dureza superficial. Fica evidente que a taxa de resfriamento tem efeito decisivo na microestrutura e consequentemente nas propriedades mecânicas e de comportamento à corrosão.

Como pode ser observado pelo exposto acima, a literatura abrange alguns aspectos relacionados a processos de soldagem empregados na fabricação de estruturas utilizando o DH 36, no entanto foi notada a escassez de referências à estudos relacionados ao comportamento quanto a resistência à corrosão e a correlação das microestruturas com as propriedades mecânicas de estruturas soldadas pelo processo MMA (*Manual Metal Arc*) e TIG (*Tungsten Inert Gas*).

1.3- Fundamentação Teórica

Os aços navais de alta tensão e baixa liga (*High-Strength Low-Alloy* HSLA) tiveram sua origem na indústria automotiva, que procurava aços que proporcionassem a produção de chapas mais finas (e mais leves) mantendo as propriedades mecânicas (Aung 2007). Estes aços também deveriam apresentar boa soldabilidade.

Hayat *et al.* (2011) em seu trabalho informa que atualmente existem 5 qualidades de aços empregados em construção naval: grau A, B, C,D e E. Esta classificação básica surgiu da necessidade de normatizar a grande variedade de aços estruturais existentes, e em 1959 as grandes Sociedades Classificadoras concordaram em padronizar estes aços em um mínimo número de graus. O que difere estes aços é sua composição química, propriedades mecânicas e soldabilidade, entre outros.

De acordo com Aung (2007), a seleção de aços para construção naval deve levar em consideração, além das propriedades mecânicas (ductilidade, resistência à tração, resistência à fratura e à fadiga), também deve apresentar boa resistência a corrosão, boa soldabilidade e baixo custo. Além disto, também devem ser consideradas as regras e regulamentações pertinentes à construção naval de sociedades classificadoras reconhecidas internacionalmente, como a *American Bureau of Shipping* (ABS), *Det Norske Veritas* (DNV), *Nippon Kaiji Kyokai* (Class NK), *Bureau Veritas* (BV), *Lloyds Register* (LR) entre outros.

Jorge *et al.* (2018) em seu trabalho reporta redução de distorções e contrações quando se mantem o aporte térmico e se aumenta a espessura, evidenciando as boas propriedades mecânicas e a boa soldabilidade do DH 36 para emprego em construção naval, onde são empregados extensamente processos de soldagem em que o aporte térmico é elevado e as espessuras de chapas são espessas.

Aung (2007) em seu trabalho descreve a relação entre o aumento da resistência a tração e escoamento com a redução do teor de carbono devido ao aumento da Perlita em aços de alta tensão DH36. Seu estudo ainda mostra que o aumento do teor de carbono diminui a energia de impacto. Portanto quantidades crescentes de Perlita afetam de forma adversa a resistência à fratura dúctil. O teor de carbono também interfere na temperatura de transição entre fratura dúctil e frágil.

A tenacidade é afetada não apenas pelo teor Perlita, mas também pelo tamanho de grão de Ferrita.

Su *et al.* (2013) descrevem o aço ASTM DH 36 como sendo um aço grau D de boas propriedades mecânicas, boa resistência a corrosão e boa soldabilidade. Estas propriedades permitem a laminação de chapas mais finas e mais leves, mantendo, no entanto, as propriedades mínimas de resistência mecânica. Estes fatores contribuíram para que o DH 36 seja extensamente utilizado em construção naval, onde são necessárias estruturas complexas montadas em várias subestruturas soldadas, e que se beneficiam das menores espessuras das chapas, pois isto diminui o peso final da embarcação.

O trabalho de Wang *et al.* (2014) foi direcionado ao estudo de corrosão em aços para construção naval DH36 no ambiente marinho, e cita a importância de inspeções nas áreas propícias a ação de corrosão, como tanques de lastro de fundo duplo, tanques que passam por sistemas de inertização (no caso de navios químicos e petroleiros) e chapeamento do casco. Tanques de lastro são estruturas com a finalidade de armazenar água para que seja possível a manutenção da estabilidade, flutuabilidade e calado em diferentes condições operacionais (HEYER *et al.* 2013). Os tanques de lastro estão, assim como o chapeamento do casco, em contato constante com a água do mar. Assim como outras estruturas soldadas da embarcação, os tanques de lastro precisam ter garantidas sua estanqueidade e resistência estrutural. Por este motivo é necessária a inspeção periódica para determinar eventuais pontos ou áreas afetadas por corrosão e perda de material e consequente redução de espessura, que podem levar a trincas e a perda de estanqueidade e resistência estrutural.

Wang (2009) em seu trabalho faz referência a processos de corrosão em ambiente marinho e seus experimentos foram feitos com aços DH 36 e A 3 em solução de NaCl e Amônia Nitrogenada. Foram utilizados durante sua investigação medições de polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica. Seus estudos foram voltados a comparação de níveis de corrosão que ocorrem em águas poluídas e não poluídas. No entanto seus resultados revelaram que corpos de prova submetidos a diferentes concentrações de Amônia Nitrogenada tinham suas taxas de corrosão reduzidas. As áreas de uma embarcação expostas ao ambiente marinho estão sujeitas a várias condições de mar, e com diferentes poluentes diluídos na água salgada, principalmente em áreas

portuárias próximas a polos industriais e químicos, que podem liberar dejetos que venham a contaminar a água do mar e introduzir elementos que venham a interferir no mecanismo de corrosão.

Conforme já citado, as embarcações são estruturas complexas formadas por vários componentes e subcomponentes unidos através de processos de soldagem. Entre estes componentes, há os elementos estruturais. Segundo Wang *et al.* (2014), há 3 tipos de elementos estruturais:

- a- Painéis de chapas (chapeado, painel reforçado chapa corrugada);
- b- Suportes menores (reforços, vigas e colunas);
- c- Suportes principais (vigas)

Painéis de chapas podem ser consideradas elementos estruturais básicos e sujeitos principalmente a cargas planas (tensão e compressão). Suportes são projetados para suportar cargas laterais, de cisalhamento e flexão. A redução de seção de qualquer um destes elementos devido à corrosão pode acarretar perda de resistência aos esforços aos quais as estruturas estão sendo submetidas, podendo ocasionar deformações e colapsos de estrutura, gerando instabilidades e fraturas destes elementos (WANG *et al.* 2014).

Nas Figuras 1 e 2 é possível verificar os vários elementos estruturais que compõe o casco de um navio. Neste exemplo é apresentada a estrutura de um casco duplo, onde é possível verificar o chapeado do costado, separado do chapeamento do porão por tanques de lastro. As cavernas, gigantes e longarinas compõe a estrutura que vai dar estabilidade estrutural e vão suportar os esforços mecânicos aos quais a embarcação será submetida.

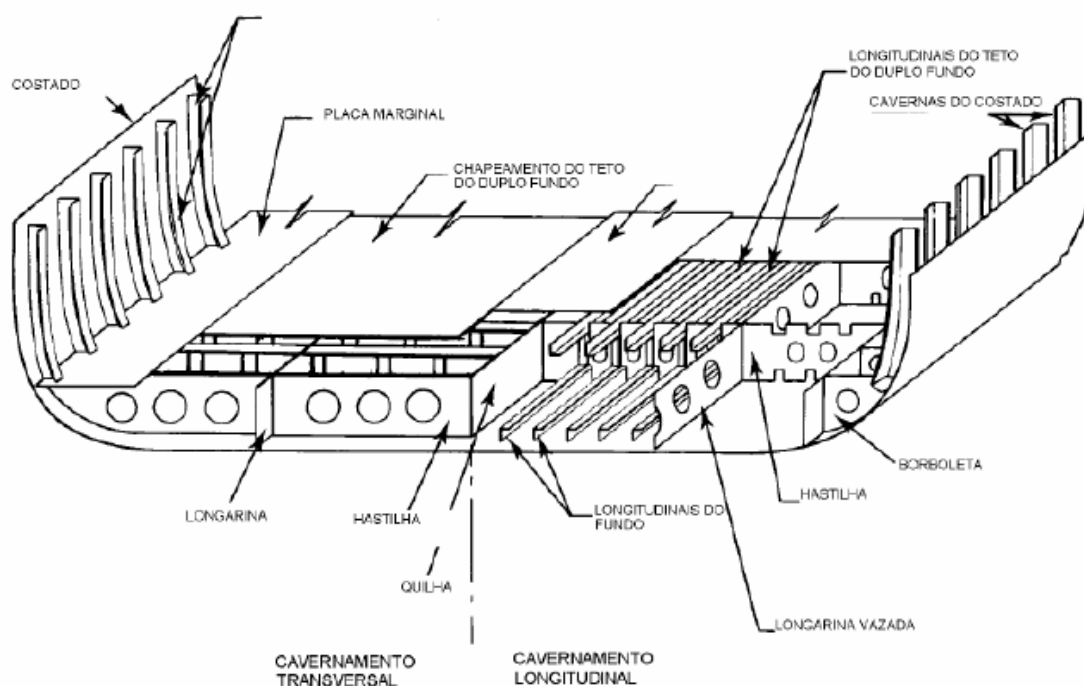


Figura 1: Seção típica de casco duplo fundo de navio. Fonte: Fajarra (2006)

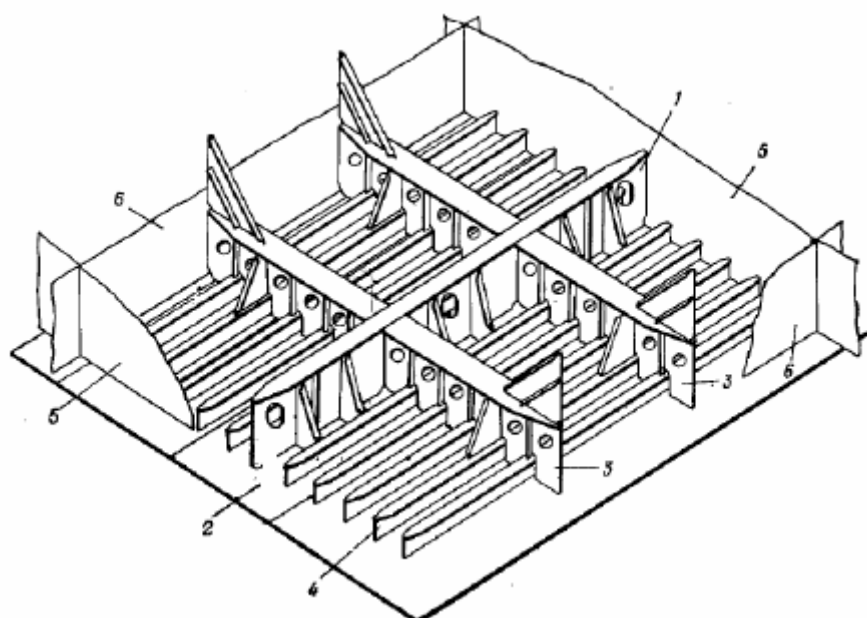


Figura 2: Painel de fundo de navio de carga geral: (1) quilha; (2) chapeamento; (3) hastilha; (4) longitudinal leve; (5) antepara transversal e (6) antepara longitudinal. Fonte: Fajarra (2006)

Wang *et al.* (2014) em seu trabalho chamam a atenção para o fato de que em muitos casos, os efeitos das tensões residuais provocadas durante o processo de soldagem, e sua influência nos processos de corrosão, não recebem a devida atenção, pois os estudos atuais apontam a corrosão por pite como a principal razão para a redução de resistência, não levando em consideração os efeitos da corrosão

sob tensão. Também o comportamento plástico do material da estrutura do casco durante a vida útil da embarcação, quando o mesmo é submetido a varrições de carga, contribui para a redução da tensão residual.

O DNV (2013), hoje DNV GL, sociedade internacional classificadora de origem Norueguesa que regulamenta e normatiza a construção e reparos de embarcações, caracteriza a corrosão em navios em 4 categorias:

- 1- Corrosão geral: degradação é uniformemente distribuída sobre a superfície do metal. Pode ser encontrada em áreas vazias sob o deck, em tanques de óleo, devido ao sistema de inertização e vapores provenientes do óleo. O sistema gerador de gás inerte proveniente de queimador proporciona atmosfera com nível de oxigênio abaixo de 5% para evitar a combustão de hidrocarbonetos, no entanto, durante a combustão, há emissão de SO_2 , SO_3 e CO_2 (WANG *et al.* 2014) que tenderão a condensar devido à flutuação de temperatura e se dissolverão na camada de água residual localizadas nas anteparas dos tanques, gerando ambientes ácidos.
- 2- Corrosão por pite: corrosão que ocorre em áreas distribuídas aleatoriamente, que possui área de décimos de milímetro, e que se deve geralmente a danos no revestimento de proteção (WANG *et al.* 2014). A ação de bactérias redutoras de sulfatos que se proliferam em água condensada com baixa concentração de O_2 é uma das principais causadoras de corrosão por *pitting* em tanques de lastro.
- 3- Corrosão de fresta: a perda de material ocorre normalmente em áreas adjacentes à juntas soldadas de reforços (DNV 2013). De acordo com Wang *et al.* (2014), também pode ocorrer corrosão intergranular na zona afetada termicamente (ZTA), com perda de metal paralela a solda. Ainda de acordo com Wang *et al.* (2014), tensões residuais podem acarretar tricas por corrosão sob estresse.

Na Figura 3 verifica-se a corrosão de fresta, que está ocorrendo entre uma longitudinal e chapa de deck. Os elementos foram soldados por filete e é possível perceber a perda de material, redução de espessura das chapas e redução da garganta da solda.

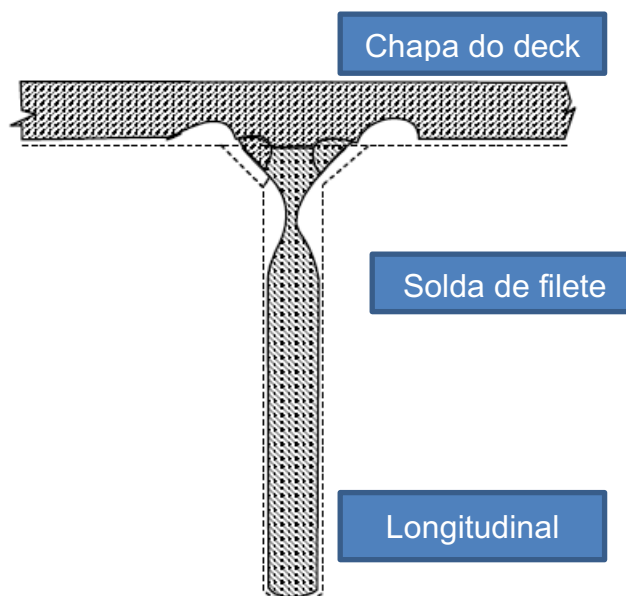


Figura 3: Corrosão de fresta em junta soldada de reforço: chapa do deck (Deck plating); solda de filete (Fillet weld); longitudinal. Fonte: DNV (2013)

- 4- Corrosão de borda: é encontrada principalmente em torno de áreas de corte de chapas em estruturas de cavernas, e nas bordas livres das longitudinais sob deck.

Na Figura 4 observa-se exemplo de corrosão de borda ocorrendo em borda livre de longitudinal soldada em chapa do deck.

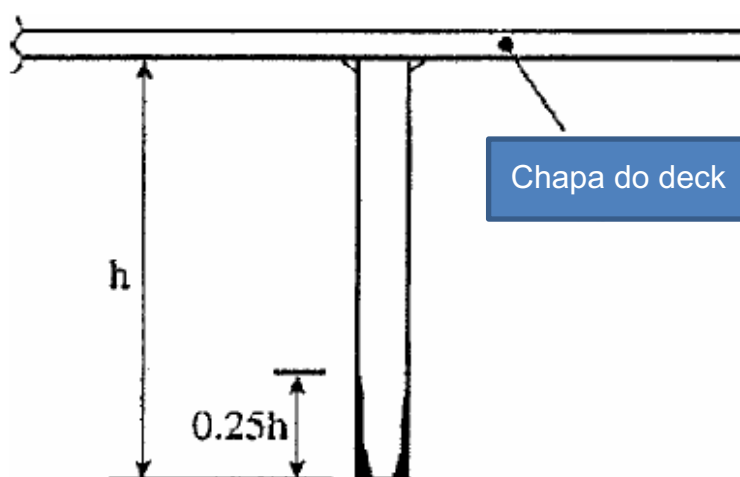


Figura 4: Corrosão de borda em longitudinal sob deck. Fonte: DNV (2013)

Nas imagens da Figura 5 (a) e (b) são mostrados dois exemplos de reparos empregados em navios. O primeiro exemplo é referente ao reparo efetuado em tanque de lastro de navio porta containers. A localização da área afetada é mostrada na Figura 5 (a) e (b). A área corroída e trincada estava localizada no topo do tanque

(deck do porão de carga), próximo as anteparas de tanque de combustível, castanhas de fixação de containers e estruturas do chapeado de costado, todas áreas sujeitas a grandes esforços mecânicos, e que também sofreram intenso aporte térmico devido aos trabalhos de soldagem durante a fabricação.



Figura 5: (a) Exemplo de corrosão- tanque de lastro- localização no deck e (b) detalhamento da trinca aparente no tanque de lastro. Fonte: autor (2019).

Nas Figuras 6 (a) e (b) são apresentados exemplos de corrosão por fresta em chapa inserida e soldada em costado de navio. Como pode ser observado, a corrosão acentuada se localiza no cordão de solda e regiões adjacentes (ZTA), provavelmente devido às alterações de microestrutura nestas regiões e o fato desta chapa inserida estar localizada próxima a linha d'água, fato que acarreta o contato constante desta chapa com a água salgada do mar.

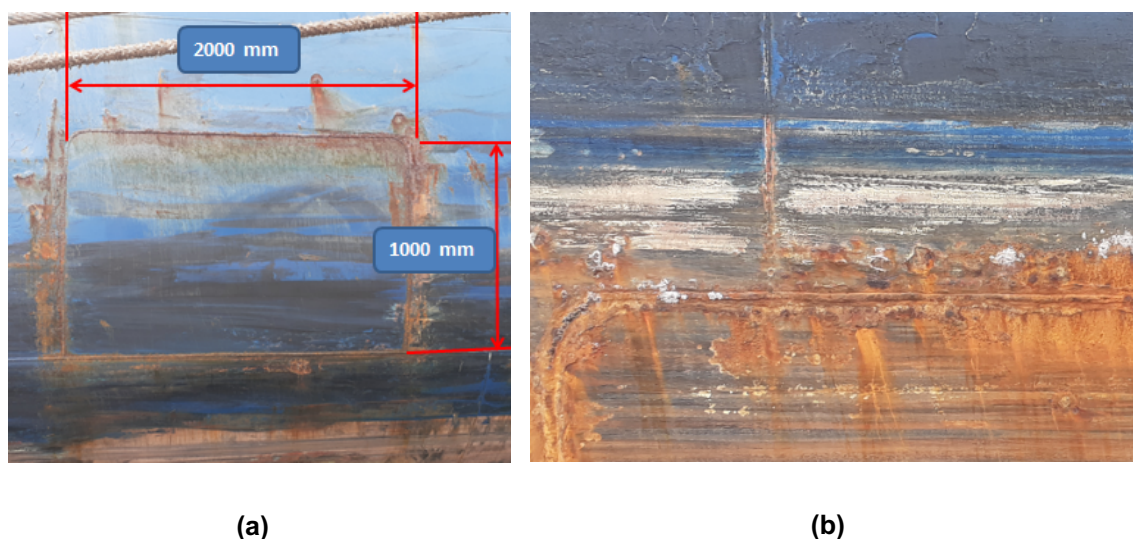


Figura 6: (a) Exemplo de corrosão por fresta em costado de navio e (b) detalhe de corrosão por fresta na junta soldada. Fonte: autor (2019).

O segundo exemplo (Figura 7) mostra dano no costado de navio, no chapeamento de casco a boreste e a meia nau da embarcação, devido a choque contra outra embarcação. Foram afetadas partes da estrutura do porão de carga e tanque de lastro, como por exemplo, cavernas, longarinas, borboleta de bojo, bolina e chapeamento de costado. Todos os reparos exemplificados foram realizados com chapas de aço de alta tensão ASTM A131 DH 36, através de processos de soldagem (MMA), com posterior ensaio de líquido penetrante e ultra-som para assegurar garantia de qualidade do reparo.



Figura 7: (a) Exemplo de reparos em casco- colisão e (b) imagem interna de reparos em casco- colisão. Fonte: autor (2019).

1.3.1. Processos de Soldagem na Indústria Naval

A soldagem pode ser definida como o processo metalúrgico que ocasiona a fusão dos materiais a serem unidos a partir da introdução de energia térmica e pressão (Okumura *et al.* 1982).

Vários processos de soldagem são utilizados em estaleiros para a fabricação de partes estruturais de navios (chapeamento de costado, transversais de fundo e convés, longitudinais gigantes, reforços, cavernas, etc.), como por exemplo, MMA, GMAW, TIG entre outros. Para a soldagem de chapas de painéis, são utilizados processos automatizados de soldagem, uma vez que são necessárias soldas extensas em posição plana horizontal. Neste caso o processo mais utilizado é o arco submerso. Para a fase de edificação no dique seco, o processo MMA manual e GMAW é amplamente empregado devido a sua versatilidade quando da

necessidade de executar soldas nas posições plana, vertical, horizontal e sobre cabeça.

Os processos MMA e TIG também são empregados quando há necessidade de efetuar reparos a bordo, sejam reparos estruturais em casco ou em equipamentos. Ambos os processos utilizam como fonte de energia para a fusão do metal de adição e metal de base um arco elétrico, que vai provocar a rápida elevação da temperatura na região de soldagem acima da temperatura de fusão (poça de fusão), e posterior resfriamento a temperatura ambiente, gerando áreas bem definidas, como a Zona Termicamente Afetada (ZTA) e a Zona de Fusão (ZF). Este ciclo térmico provocará profundas alterações nas áreas citadas, cujas propriedades mecânicas e metalúrgicas serão diferentes quando comparadas as propriedades do metal base (CHUJUTALLI, 2017). Estas variações das propriedades mecânicas e metalúrgicas são devidas ao grande aporte térmico envolvido nos processos de soldagem e posterior resfriamento em condições de não equilíbrio (não homogêneo), o que acarreta a transformação de fases (decomposição da austenita nas diversas microestruturas) e mudanças volumétricas (contração volumétrica devido ao alto gradiente de resfriamento durante a solidificação, gerando tensões residuais) (CHUJUTALLI, 2017).

1.3.2- Metalurgia da soldagem

Durante os vários processos de soldagem, há intenso aporte térmico na região da poça de fusão, que provoca alterações na metalurgia da junta soldada, principalmente na ZTA e CS, devido ao intenso ciclo térmico e elevadas taxas de troca de calor entre a poça de fusão e o metal base adjacente. Entre as alterações observadas, é possível citar a alteração de microestrutura, formação de novas fases, tais como os carbonetos.

Algumas fases e microconstituintes que podem compor os aços da indústria naval são aqui apresentadas em breve descrição:

Ferrita: solução sólida de carbono em ferro CCC, existente até a temperatura de 912°C (SILVA *et al.* 2010).

Austenita: solução sólida de carbono em ferro CCC existente entre 427 e 1495°C (SILVA *et al.* 2010).

Cementita: carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica e de alta dureza, e que dá origem a um eutetóide, a perlita (SILVA *et al.* 2010).

Perlita: estrutura formada pelo conjunto de lamelas de ferrita e cementita com a mesma orientação cristalográfica, que possuem crescimento cooperativo, e que possuem placas paralelas destas duas fases (COLPAERT 2008).

Ferrita Acicular: fase que nucleia diretamente no contorno de grãos austeníticos, com forma de ripas e placas, ou que se desenvolve diretamente de alotriomorfos nucleados inicialmente no contorno de grão (COLPAERT 2008).

Ferrita Alotriomorfa: ferrita que nucleia e cresce ao longo do contorno de grão austenítico original.

A velocidade de resfriamento vai ter papel fundamental na alteração da microestrutura, propriedades mecânicas e resistência à corrosão.

1.3.3- Processo de soldagem MMA (*Manual Metal Arc*)

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido consiste na utilização de eletrodo constituído de arame em seu núcleo, com revestimento fundente, que é consumido a partir de um arco gerado entre o eletrodo e o metal base (Okumura *et al.* 1982).

De acordo com Wainer *et al.* (1992), os equipamentos para soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido são:

- a- fonte de energia;
- b- alicate para fixação dos eletrodos;
- c- cabos de interligação;
- d- pinça para ligação da peça;
- e- equipamento de proteção individual;
- f- equipamento para limpeza da solda.

Na Figura 8 é possível de se observar o arranjo básico de equipamento de solda para eletrodo revestido, como por exemplo, a fonte de energia, os cabos elétricos e o alicate porta eletrodo.

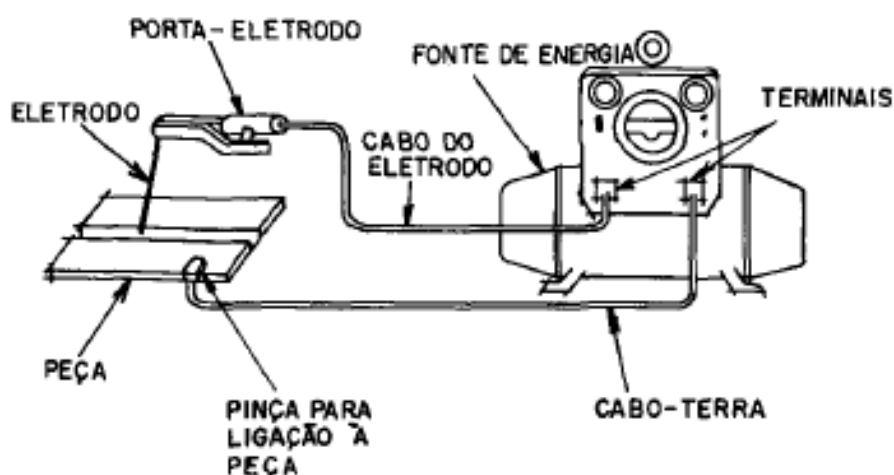


Figura 8: Esquema básico de ligação do processo MMA. Fonte: Wainer *et al.* (1992)

No processo de soldagem MMA, o eletrodo se funde devido à elevação da temperatura proporcionada pelo arco elétrico e se transforma em gotas, que são transferidas para a poça de fusão. Quando se usa correntes de alta intensidade, estas gotas se apresentarão finas e numerosas, e serão de formato globular quando são usadas correntes de baixa intensidade (Okumura *et al.* 1982).

Na Figura 9 verifica-se o modo de transferência de metal no processo eletrodo revestido (MMA). O revestimento do eletrodo fornece elementos de liga à poça de fusão, proteção gasosa e formação da escória, que tem a finalidade de oferecer proteção mecânica e conformar o cordão durante a solidificação.

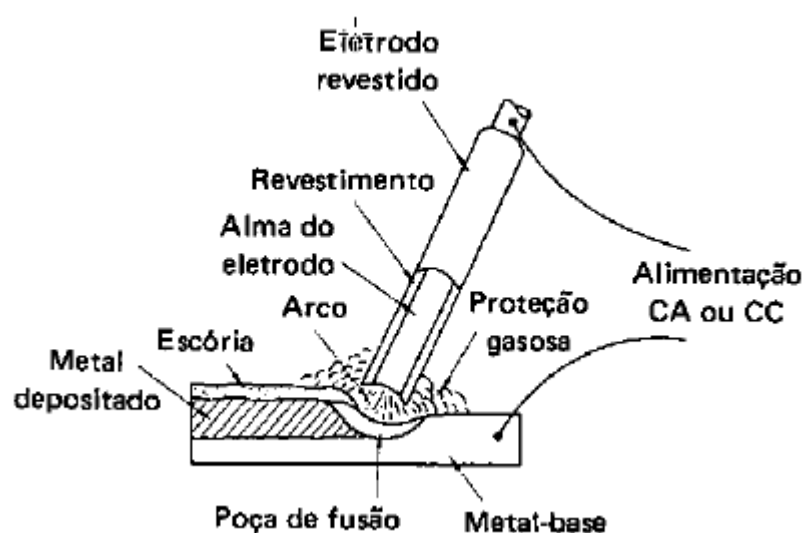


Figura 9: Modo de transferência de metal. Fonte: Okumura *et al.* (1982).

Na Figura 10 (a) e (b) se observa detalhes da forma de transferência no processo eletrodo revestido (MMA). Na Figura 10 (a) quando a corrente é alta a

transferência se dá através de pequenas gotas de metal. Pode ser empregada na soldagem em posição plana ou horizontal. O jato tem formato cônico (Wainer *et al.* 1992). Em (b) quando a corrente é baixa a transferência ocorre com glóbulos maiores.

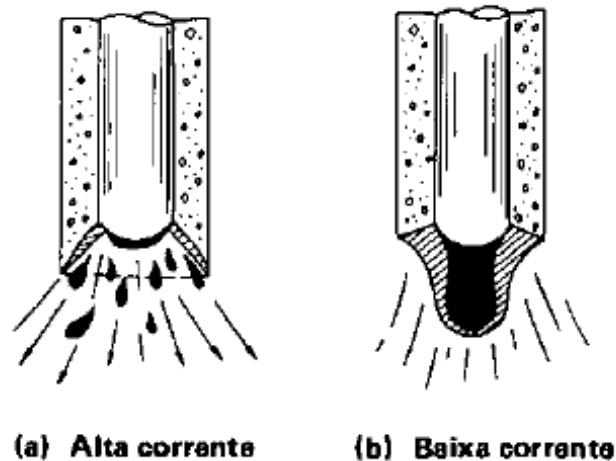


Figura 10: Modo de transferência (a) alta corrente e por glóbulos pequenos (b) baixa corrente e glóbulos grandes. Fonte: Okumura *et al.* (1982).

O modo pelo qual se processa a transferência do metal em fusão afeta a qualidade e as propriedades mecânicas e microestruturais da solda. Além deste fator, vários autores citam outras características que tornam a soldagem um processo complexo, como por exemplo, as interações eletromagnéticas na poça de fusão (sopro magnético), a transferência de calor e os fenômenos metalúrgicos que ocorrem na solidificação da poça de fusão, entre outros. Além dos fatores já citados, também há a influência do operador da soldagem, devido à forma como este movimentava o eletrodo durante a soldagem. Tong *et al.* (2016) em seu trabalho, desenvolvem estudos sobre os efeitos das mudanças de fase na geometria da poça de fusão, que será determinante na qualidade da solda. A forma como o eletrodo é movimentado durante o processo de soldagem tem influência na geometria da poça. A mudança de fase apresenta grande efeito na transferência, sobretudo nas áreas adjacentes à solda. Alipooramirabad *et al.* (2017) em seu trabalho realiza estudos sobre a importância de determinados parâmetros para a qualidade da solda, como por exemplo o desenho do chanfro e o aporte térmico, sendo estes fatores preponderantes para a formação das microestrutura e distribuição das tensões residuais na zona fundida e ZTA. Ainda em seu trabalho, Alipooramirabad *et al.* (2017) relata que a taxa de resfriamento influencia diretamente a formação das

microestruturas e tensões residuais, sendo estes dois parâmetros indicativos das propriedades mecânicas da solda, como a dureza, e seu comportamento quanto à corrosão.

1.3.4- Processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*)

O processo TIG - (*Tungsten Inert Gas*) utiliza um eletrodo não consumível através do qual é aberto o arco elétrico que será a fonte de calor para a fusão do consumível e metal base (Wainer et al 1992), e poça de fusão é protegida por um gás inerte (argônio).

Na Figura 11 verificam-se os equipamentos básicos que compõem o processo TIG, como a fonte, o gás de proteção e a tocha.

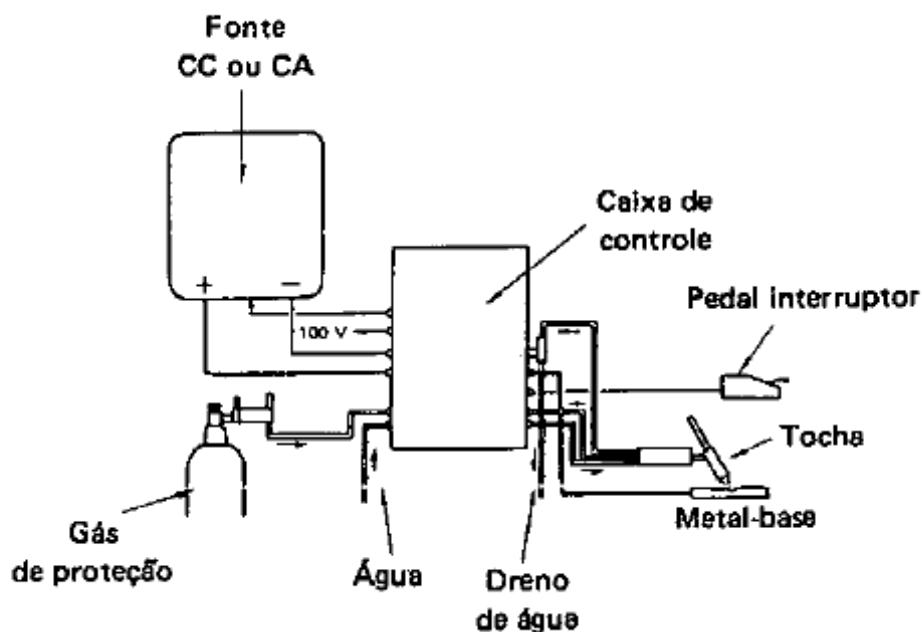


Figura 61: Esquema básico de ligação do processo TIG. Fonte: Okumura et al. (1982)

Na Figura 12 é possível ver detalhes da poça de fusão sendo abastecida pelo metal de adição proveniente do arame consumível, que está fundindo na poça de fusão devido ao calor gerado pelo arco elétrico aberto entre o eletrodo de tungstênio e o metal base, com proteção gasosa garantida pelo argônio.

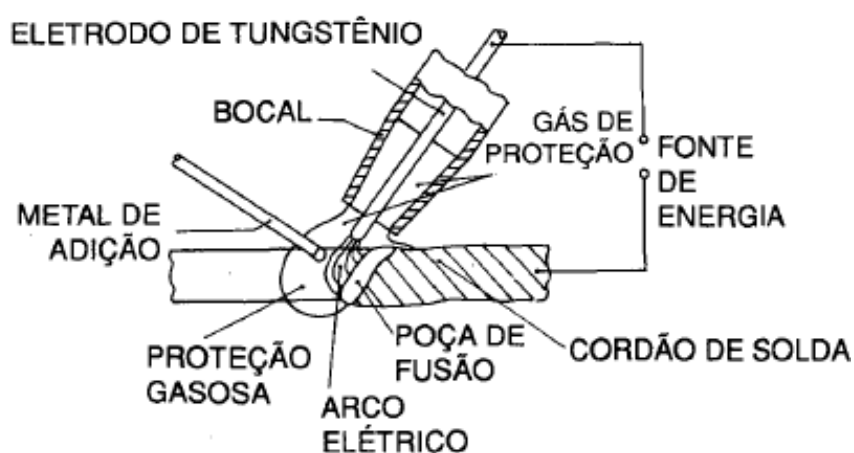


Figura 72: Modo de transferência de metal no processo TIG. Fonte: Wainer *et al.* (1992)

O processo TIG possui arco elétrico muito estável e por este motivo produz soldas de boa qualidade livres de respingos não requerendo limpeza de cordão após a soldagem. Neste processo, o arame de enchimento é introduzido diretamente na poça de fusão, independente da corrente de soldagem, sendo possível, desta forma, a penetração desejada no metal base. Esta característica permite que o processo TIG seja aplicado em uma ampla gama de espessuras de chapas, das mais finas as mais grossas.

Chen *et al.* (2016) relatam em seu trabalho, que há duas formas básicas de alimentação de arame no processo TIG: processo TIG por arame frio e processo TIG por arame quente. No processo por arame frio, o arame consumível é adicionado diretamente na poça de fusão. No processo por arame quente, este é pré-aquecido por resistência elétrica durante a alimentação na poça de fusão, e proporciona uma maior taxa de deposição. Mas a fusão final do consumível ocorrerá em ambos os casos na poça de fusão devido ao arco elétrico gerado pelo eletrodo não consumível de tungstênio. Assim como no processo MMA, há diferentes formas de transferência no processo TIG, conforme descrito a seguir e na Figura 13, onde é possível ver os mecanismos de transferência por curto circuito (a), transferência globular (b) e por spray (c).

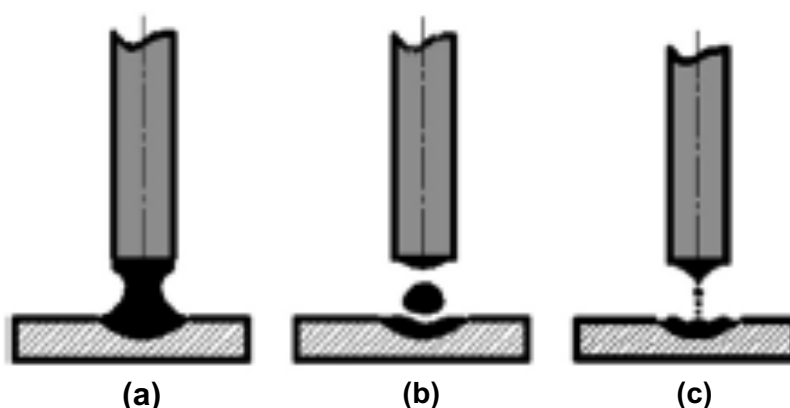


Figura 83: Transferência por curto circuito (a), globular (b) e spray (c). Fonte: Chen *et al* (2016)

Na transferência por curto circuito, a corrente normalmente é baixa e o arco elétrico curto. O metal é transferido quando o eletrodo entra em contato com a poça de fusão, fechando o curto circuito, e o metal é transferido (Chen *et al.* 2016).

Na transferência globular, ocorre a formação de glóbulos com diâmetro maior do que o diâmetro do arame. Estes glóbulos se originam do coalescimento da ponta do arame devido ao calor gerado pelo arco elétrico, quando o peso do glóbulo excede a tensão superficial, este glóbulo cai em direção à poça de fusão.

Na transferência por spray, a corrente é mais elevada e as interações eletromagnéticas se tornam predominantes e se sobrepõem a gravidade, fazendo com que o metal coalescido na ponta do arame não tenha tempo de crescer. Por este motivo, os glóbulos neste mecanismo de transferência são muito menores do que o diâmetro do arame.

A forma de transferência metálica influenciará diretamente as transformações metalúrgicas na zona afetada pelo calor (ZTA) e as distorções nas estruturas soldadas, além da taxa de deposição.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 14 descreve a sequência de eventos ocorridos neste trabalho. Os processos TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MMA (*Manual Metal Arc*) foram utilizados para a soldagem de chapas ASTM A131 DH 36 utilizadas na indústria naval. Em seguida, foi realizada a etapa de preparação de corpos de

prova e caracterizações, que consistiu em: ensaio de líquido penetrante para assegurar a qualidade de solda, corte e retífica dos corpos de prova para ensaios de microdureza, caracterização microestrutural e ensaio de corrosão. A etapa seguinte foi o estudo de correlação dos resultados dos ensaios realizados e a comparação entre os dois processos de soldagem.

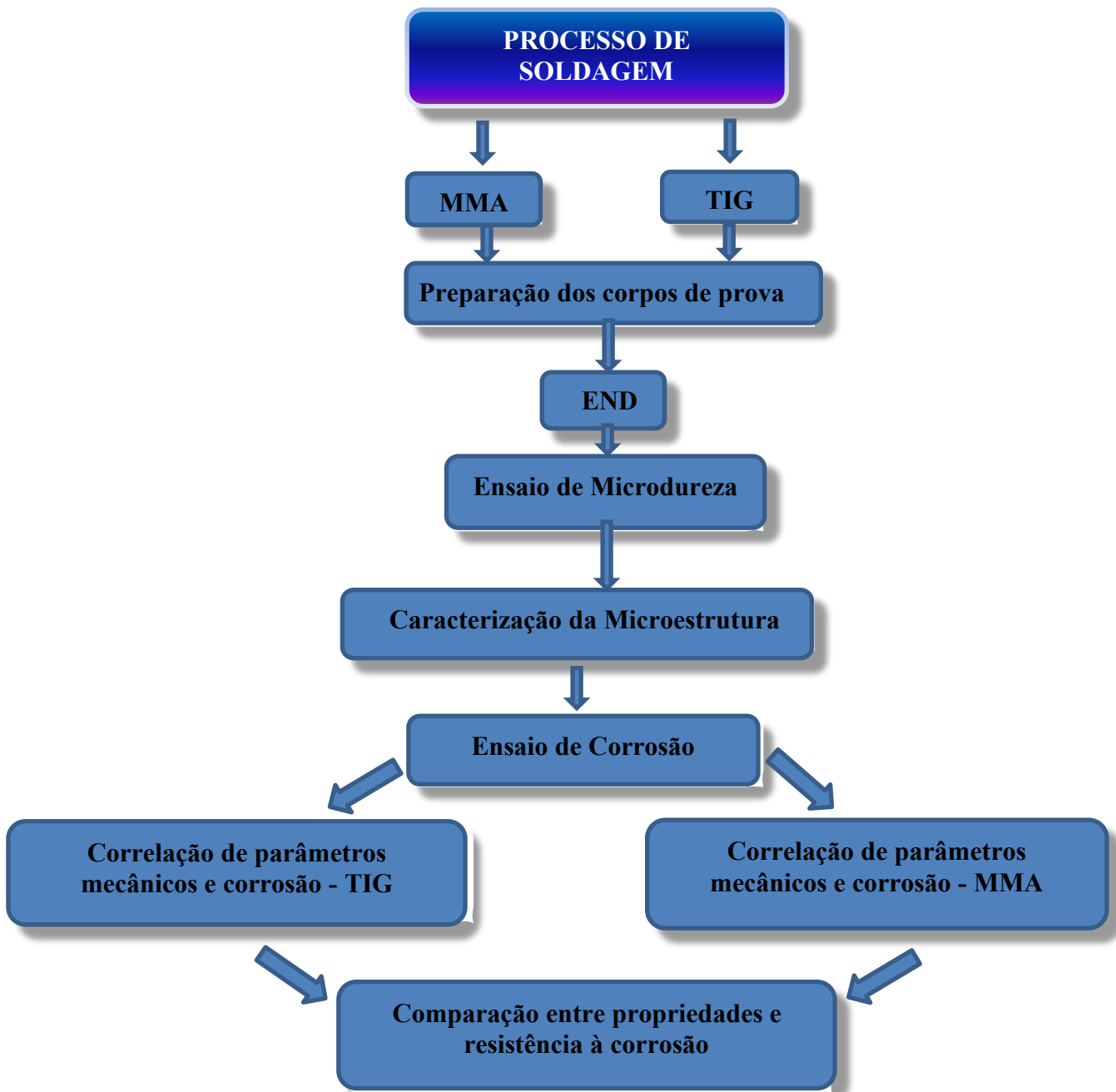


Figura 14: Fluxograma das etapas seguidas para a execução dos procedimentos experimentais da pesquisa. Fonte: autor (2019)

Os corpos de prova confeccionados para o desenvolvimento deste trabalho foram feitos a partir de chapas de aço ASTM A131 DH 36, cedidos pela empresa

USIMINAS. As principais propriedades mecânicas e químicas do aço foram coletadas pelas normas da ASTM e podem ser observadas na Tabela 1. O certificado do aço fornecido pela usina se encontra nos anexos (anexo1).

Tabela 1: Especificações do aço ASTM 131 DH 36

Propriedades Físicas	
Densidade	7,80 g/cm ³
Propriedades mecânicas	
Resistência à tração – final	490 - 620 Mpa
Limite de escoamento	350 Mpa
Alongamento de ruptura	19%
Resistência à compressão	160 Gpa
Módulo de cisalhamento	80 GPa
Impacto Charpy transversal	23,0 J
Impacto Charpy longitudinal	35,0 J
Elementos químicos	
C	≤ 0,18%
Cr	0,25%
Cu	0,35%
Fe	96,4 - 97,6%
Mn	0,90 - 1,60%
Mo	0,08%
Ni	0,40%
Nb	0,05%
P	≤ 0,040%
Si	0,10 - 0,50%
S	≤ 0,040%
V	0,10%

Fonte: adaptado de ASTM

2.1- Fabricação dos corpos de prova: Processos de soldagem

Para a confecção dos corpos de prova, as chapas de aço ASTM A131 DH 36 foram soldadas pelos processos MMA e TIG na oficina da empresa Metalock do Brasil, por soldador qualificado nos processos empregados. Os parâmetros para cada processo executado encontram-se detalhados a seguir e foram coletados por meio de multímetro FLUKE 376.

A confecção dos corpos de prova foi realizada a partir de quatro (04) chapas de aço ASTM 131 DH 36, cada uma com 1,27 cm de espessura. As chapas foram

soldadas, duas a duas, com dimensões de 50 x 100 mm, chanfro em V, ângulo de bisel de 75°, abertura de raiz de 2 mm e nariz de 2 mm para os dois processos de soldagem.

Na Figura 15 são apresentados os corpos de prova usinados (a) e (b) travados para início da soldagem. Vale ressaltar que o uso de travas para a realização dos processos de soldagem é necessário, uma vez que evitam o empenamento das chapas devido ao aquecimento que sofrem, garantindo melhor integridade a peça soldada. As travas foram utilizadas nos dois processos de soldagem. As travas foram fabricadas em chapa de aço de 1/8" de espessura e soldadas nas extremidades das chapas para evitar desalinhamento no sentido axial e transversal. Foram utilizados passes intermitentes e curtos, distantes do chanfro, para evitar aquecimento demasiado na área a ser soldada. Após soldadas as chapas, estas travas foram removidas por esmerilhamento.

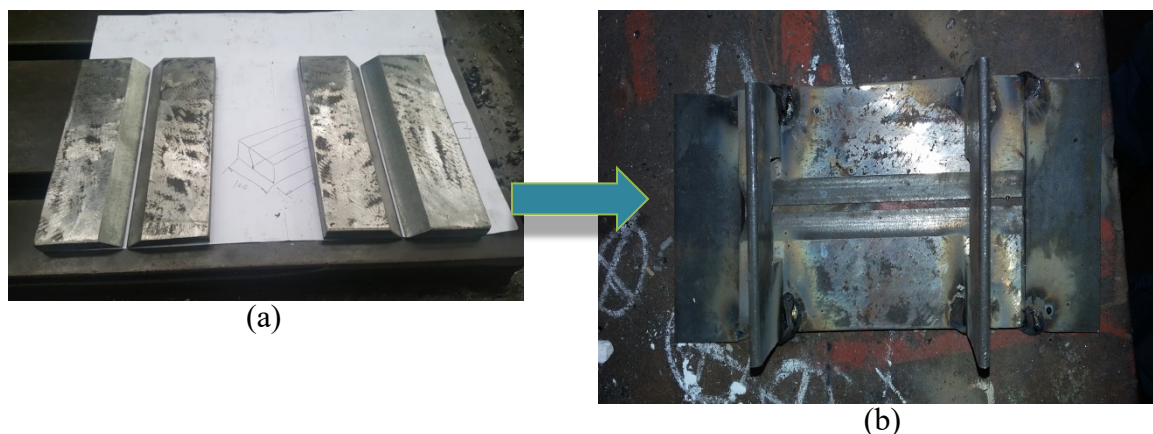


Figura 15: (a) Chapas para corpos de prova após usinagem dos chanfros e (b) Chapas travadas para a realização dos processos de soldagem. (Fonte: autor 2019)

2.1.1- Processo de soldagem MMA (*Manual Metal Arc*)

O processo de soldagem MMA consiste na utilização de uma fonte para gerar o diferencial de potencial para a abertura do arco elétrico, cabos elétricos de interligação, alicate porta eletrodo e o eletrodo, tipo revestido consumível, responsável pela abertura do arco que manterá o aporte térmico necessário para a fusão da alma do eletrodo e o metal base na poça de fusão. O revestimento do eletrodo proverá elementos de liga e proteção ao cordão de solda durante e após a

solidificação. O equipamento utilizado para a soldagem por eletrodo revestido foi uma máquina de solda modelo DPT 500 EUTECTIC, segundo parâmetros:

- Alimentação: 1x 220/380/440 50/60 Hz
- Faixa de Corrente: 5 a 500 Amperes.
- Tensão em Vazio: 80 (V)
- Ciclo de Trabalho a 35%: 500 (A)
- Ciclo de Trabalho a 100%: 420 (A)
- Potencia Aparente a 100%: 38 KVA
- Classe Térmica: H (180°C)
- Grau de Proteção: IP23

O eletrodo revestido utilizado foi o E 7018, ESAB (certificado VT208E1604, anexo 3). Este eletrodo foi selecionado para este experimento por ser um dos consumíveis mais comumente empregados em reparos navais para soldagem de chapas de aço de alta resistência, devido a suas características de deposição e mecânicas. Na Figura 16 é possível verificar exemplo de soldagem por processo MMA.



Figura 16: Soldagem por processo MMA. (Fonte: adaptado internet 2019)

Para o processo MMA foi utilizado como consumível eletrodo revestido ER 7018, com diâmetro de 2,5 mm, comprimento de 350 mm, da marca ESAB com certificado. Soldagem executada na posição vertical para os passes de raiz, enchimento e acabamento, utilizando os parâmetros de soldagem descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de Soldagem MMA

PARÂMETROS DE SOLDAGEM PROCESSO MMA							
Passe	Processo	Consumível	ϕ mm	Polaridade	Posição	Amperagem	Voltagem
Raiz	MMA	ER 7018	3,25	CC+	vertical	95 ~ 115	21 ~ 27
Enchimento	MMA	ER 7018	3,25	CC+	vertical	95 ~ 115	21 ~ 27
Acabamento	MMA	ER 7018	3,25	CC+	vertical	95 ~ 115	21 ~ 27

Na Figura 17 observa-se a configuração de chapas soldadas pelo processo MMA a serem seccionadas para a confecção de corpos de prova, onde teremos como avaliar as regiões de interesse resultantes do processo de soldagem, a citar: metal de base; zona termicamente afetada e cordão de solda.



Figura 17: Chapas soldadas pelo processo MMA para confecção dos corpos de prova. (Fonte: autor 2019)

2.1.2- Processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*)

O processo de soldagem TIG tem por finalidade a união de elementos soldáveis a partir da fusão de arame consumível e metal de base na poça de fusão, através de arco elétrico aberto por eletrodo não consumível de tungstênio, com a utilização de atmosfera de gás inerte para a proteção da poça de fusão. O equipamento utilizado para este processo de soldagem das chapas de aço ASTM A131 DH 36 consistiu de uma fonte inversora DC, modelo ADC 500 EUTECTIC, tendo como parâmetros de soldagem:

- Tensão de Entrada: 220/380 (V)
- Fase: 3(fases)
- Frequência: 50/60 Hz
- Consumo: 14 KVA
- Ciclo de Trabalho (%): 60%-500A, 100%-387A
- Escala de Voltagem: 60-80 V
- Escala de Amperagem: 50-500 A
- Gás Inerte: Argônio 2.2 Air Liquid
- Arame: AWS A5.18 ER70S-3 Lincoln Electric (certificado Y178073251, anexo 2).
- Eletrodo de Tungstênio 1/8"

Na Figura 18 observa-se exemplo de soldagem por processo TIG, com a tocha e o arame consumível sendo utilizados na posição plana horizontal.



Figura 18: Soldagem por processo TIG. Fonte: adaptado internet (2019)

Na Figura 19 é possível de se observar o corpo de prova durante soldagem pelo processo TIG. Pode-se observar as chapas de aço ASTM A 131 DH36, o passe de raiz e as travas empregadas para conter a deformação (empenamento) que podem ocorrer durante o processo.

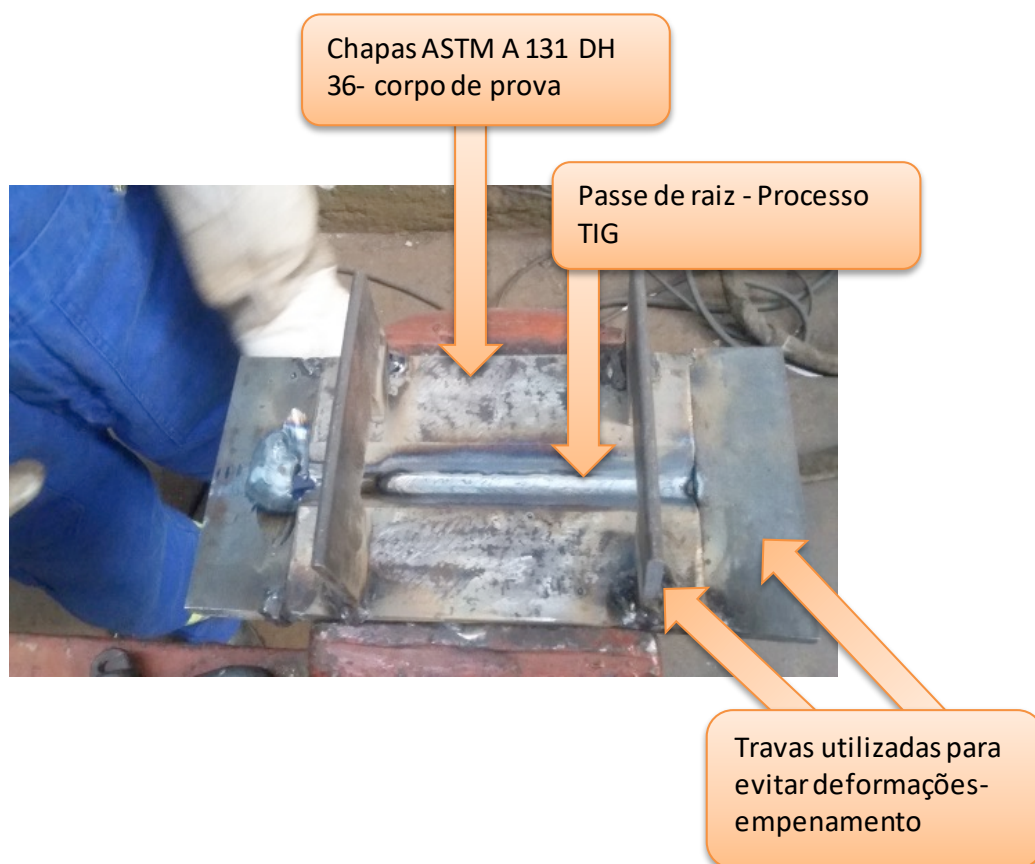


Figura 19: Corpo de prova durante soldagem TIG. Fonte: autor (2019)

Portanto, para o processo TIG foram utilizados como consumíveis varetas ER 70S3, com diâmetro de 3,25 mm, comprimento de 1000 mm, da marca LINCOLN ELETRIC com certificado, gás de proteção Argônio e eletrodo de tungstênio 2% de tório. Soldagem executada na posição plana para os passes de raiz, enchimento e acabamento, utilizando os parâmetros de soldagem descritos na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de Soldagem TIG

PARÂMETROS DE SOLDAGEM PROCESSO TIG							
Passe	Processo	Consumível	φ mm	Polaridade	Posição	Amperagem	Voltagem
Raiz	TIG	ER 70 S3	2,4	CC+	plana	70 ~ 90	13 ~17
Enchimento	TIG	ER 70 S3	2,4	CC+	plana	70 ~ 90	13 ~17
Acabamento	TIG	ER 70 S3	2,4	CC+	plana	70 ~ 90	13 ~17

Na Figura 20 temos a configuração das chapas soldadas pelo processo TIG a ser seccionada para a confecção de corpos de prova, possibilitando avaliar as regiões de interesse resultantes do processo de soldagem realizado, a citar: metal de base; zona termicamente afetada e cordão de solda.



Figura 20: Chapas soldadas pelo processo TIG para confecção dos corpos de prova. Fonte: autor (2019)

2.2- Avaliação da Qualidade da Solda: Ensaio não destrutivo

Após a realização da soldagem das chapas pelos processos MMA e TIG, foram realizados ensaios não destrutivos por líquido penetrante, segundo norma ASTM E 165, visando à verificação da qualidade da solda quanto à detecção de eventuais descontinuidades superficiais como trincas e poros.

Para os ensaios por líquido penetrante, as chapas depois de soldadas passaram por limpeza de suas superfícies e posterior aplicação do líquido penetrante da marca comercial METAL CHECK tipo II-A, penetrante VP - 30, deixado em repouso por 15 minutos para que o líquido, por capilaridade, penetrasse nas possíveis falhas superficiais do material e em seguida o excesso do líquido foi removido com água e a superfície foi seca. Na sequência, foi aplicado o pó revelador D - 70, deixado em repouso por mais 10 minutos, e então verificada a conformidade ou não das soldas por meio da técnica de observação.

2.3- Preparação dos corpos de prova para: caracterização microestrutural; ensaios de dureza; corrosão eletroquímica.

Os corpos de prova foram cortados com a utilização de serra mecânica modelo UBS 200, número de série 4558, localizada no laboratório de mecânica da

Universidade Santa Cecília. Os corpos de prova foram seccionados nas dimensões (100 x 10 x 12)mm e sinetados para fins de identificação conforme abaixo:

- Total de (06) seis corpos de prova preparados do processo MMA
- Total de (06) seis corpos de prova preparados do processo TIG

Na Figura 21 (a) é possível visualizar os corpos de prova cortados a partir da chapa solda e na Figura 21 (b) exemplo de corpos de prova com superfícies retificadas. Este procedimento de retífica é realizado com a finalidade de eliminar marcas (riscos) mais profundas oriundas do processo de corte por serra mecânica, sendo que o processo de retificação das superfícies foi realizado com resfriamento a água, evitando qualquer possível transformação microestrutural em estado sólido.



(a)



(b)

Figura 21: (a) Corpos de prova cortados em serra e (b) Superfícies retificadas. Fonte: autor (2019)

Depois da retificação das superfícies, os corpos de prova foram preparados para ensaios de metalografia no Laboratório de Metalografia da Universidade Santa Cecília, de acordo com norma ASTM E 3 e ASTM E 407. Portanto, os corpos de prova após lixamento, realizado com lixas com granulometria de 100, 240, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*, e em seguida polimento em politriz de fabricação Buehler, modelo ECOMET I, com pasta de diamante (6 μm), encontravam-se prontos para: caracterização microestrutural, dureza e ensaios de corrosão.

2.4- Ensaio de dureza e rugosidade

O conhecimento da dureza em uma junta soldada revela as propriedades mecânicas relacionadas às microestruturas formadas durante o processo de soldagem nas diferentes regiões (zona termicamente afetada, metal fundido), e podem ser comparadas às propriedades do metal base. Estruturas refinadas, com grãos mais finos, apresentarão dureza mais elevada e limite de escoamento superior quando comparadas a estruturas de grão mais grosseiro. Nos processos de soldagem o tamanho de grão está relacionado, entre outros fatores, ao aporte térmico introduzido durante a soldagem, ao gradiente de perda de calor após a soldagem, além dos elementos de liga existentes no metal base que controlam o crescimento de grão por meio da precipitação de carbonitreto nos contornos de grão, e que tem a finalidade de preservar as propriedades mecânicas (Okumura *et al.* 1982; Wainer *et al.* 1992).

Desta forma, o ensaio de dureza foi realizado com o objetivo de comparar esta propriedade mecânica nas juntas soldadas pelos processos MMA e TIG. O conhecimento das propriedades mecânicas de uma junta soldada são relevantes, pois indicam o comportamento desta junta quando submetida a esforços de natureza mecânica, sendo possível prever a capacidade desta junta soldada de resistir ou transmitir esforços sem romper ou deformar além do previsto, garantindo desta forma, a integridade da junta soldada e da estrutura.

Para o estudo comparativo de dureza entre os processos de soldagem experimentados, foram realizados ensaios de dureza Vickers, metodologia que consiste na resistência à penetração de uma ponta com formato de diamante com base quadrada e ângulos de faces de 136° , sob determinada força, segundo norma

ASTM E384. As regiões de interesse para comparação e realização dos ensaios são: metal de base; zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida.

Após as superfícies estarem devidamente preparadas (lixadas e polidas), os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de dureza no Laboratório TORK, localizado na cidade de São Paulo, laboratório colaborador. Foram realizados ensaios de microdureza Vickers seguindo norma ASTM E384. Ed.17. Carga aplicada de 500 gf durante 15 segundos para cada endentação. No total foram realizadas 19 medições (endentações) em cada um dos corpos de prova, sendo 10 na região da face de solda e 9 na região da raiz da solda. Na Figura 22 identificam-se as regiões e posições exatas das medições da microdureza, onde foram realizadas as endentações.

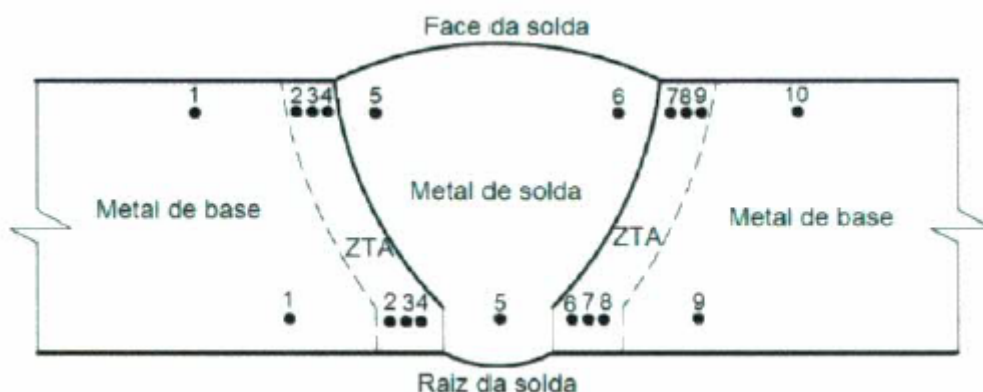


Figura 22: Mapeamento de corpo de prova, indicando a localização das endentações. Fonte: adaptado laboratório Tork (2019)

Os corpos de prova soldados por eletrodo revestido (MMA) e *Tungsten Inert Gas* (TIG) foram preparados superficialmente e suas superfícies verificadas quanto à rugosidade em rugosímetro MITUTOYO SJ 201. Os corpos de prova foram ensaiados em duas direções (direção transversal e longitudinal).

2.5- Caracterização microestrutural dos corpos de prova soldados

A importância da caracterização microestrutural em elementos soldados consiste no adequado conhecimento das propriedades mecânicas oriundas das diferentes microestruturas geradas durante a soldagem e que são diretamente afetadas por fatores como o ciclo térmico, processo de soldagem empregado, metal base e consumíveis empregados entre outros, durante o processo de soldagem.

Como exemplo é possível citar o trabalho de Hayat *et al.* (2011) que demonstra que a fração em volume de martensita afeta diretamente a dureza, uma das propriedades mecânicas relacionadas a esta microestrutura. A dureza aumenta com o aumento em volume da martensita.

Aung (2007) em seu trabalho afirma que o comportamento mecânico do aço ao carbono depende de sua microestrutura, como por exemplo, as presenças de perlita fina e grossa, perlita esferoidal, bainita, martensita e austenita. Mecanicamente, a Perlita possui propriedades intermediárias entre a ferrita (ductilidade e dureza menor) e a cementita (dureza maior e fragilidade). Também é fator preponderante nas propriedades mecânicas associadas a microestrutura o tamanho, forma e distribuição dos grãos. Bhadeshia (2007) em seu trabalho informa sobre a importância de obter estruturas refinadas para assegurar características de maior resistência ao aço. Logo, a correta caracterização da microestrutural e seus microconstituintes resultantes dos processos de soldagem (MMA e TIG) estudados neste trabalho, tornam possíveis as correlações com os resultados obtidos de propriedades frente à avaliação mecânica e corrosão.

Os corpos de prova após lixamento e polimento foram submetidos a ataque químico para a devida caracterização microestrutural resultante de seus processos de soldagem. A solução de ataque utilizada foi o NITAL a 5% por passada. Após ataque os corpos foram observados em microscópio óptico, OLYMPUS GX41, com fonte de luz de 100 W, com auxílio do software OLYMPUS Stream Essentials, pertencente ao laboratório do Grupo de Pesquisa em Solidificação (GPS) instalado na Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Portanto, os corpos de prova dos dois processos de soldagem foram observados por microscopia nas regiões: metal de base; zona termicamente afetada e zona fundida (cordão de solda).

2.6- Ensaio de corrosão: espectroscopia de impedância eletroquímica e polarização linear

Os ensaios de resistência à corrosão foram realizados no laboratório de corrosão do Grupo de Pesquisa em Solidificação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Os corpos de prova soldados pelos processos TIG e MMA foram submetidos aos ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e Polarização Potenciodinâmica (Polarização linear) para estabelecer a correlação entre resistência à corrosão e as microestruturas formadas nos corpos de prova soldados pelos dois processos. Os ensaios foram realizados em um potenciostato / galvanostato AUTOLAB 128N, controlado pelo programa NOVA 11.2, os corpos de prova soldados foram montados na célula eletroquímica, tendo como eletrodo de trabalho $0,8 \text{ cm}^2$ da superfície das amostras em contato com o eletrólito, contra-eletrodo uma placa de platina, eletrodo de referência Ag/AgCl e solução eletroquímica de 0,5 M NaCl a 25°C .

Nos testes de impedância foi utilizada uma amplitude ajustada em 10 mV em relação ao potencial de circuito aberto, com sinal AC, pico a pico com 10 pontos por década em faixa de frequências de 0,01Hz a 100KHz. Os ensaios deram início após estabelecer o potencial de circuito aberto alcançado com 30 minutos de imersão amostra/eletrólito.

Para os testes de polarização linear, as curvas foram determinadas com taxa de varredura de 1 mV/s de -200mV a +600mV em relação ao potencial de circuito aberto. Os ensaios de polarização foram realizados na sequência dos ensaios de impedância, sendo verificado se o potencial estava em equilíbrio com o sistema (E_{OCP}). Com as curvas experimentais de polarização foram determinados pelo método de extrapolação de Tafel, a taxa (i_{corr}) e o potencial de corrosão (E_{corr}) (Gentil 1996).

Na Figura 23 (a) pode ser observado o aparato experimental montado contendo o potenciostato, o corpo de prova posicionado na base da célula e a solução de 0,5 M NaCl. Na Figura 23 (b) verifica-se a célula montada no interior da gaiola de Faraday, com eletrodos conectados e prontos para realização do ensaio.

Vale ressaltar que os ensaios para determinar a resistência à corrosão do aço aplicado na indústria naval foram realizados nos corpos de prova dos dois processos de soldagem, nas regiões: metal de base; zona termicamente afetada e zona fundida (cordão de solda). Todos em triplicata para garantir a repetitividade do comportamento experimental do material estudado.

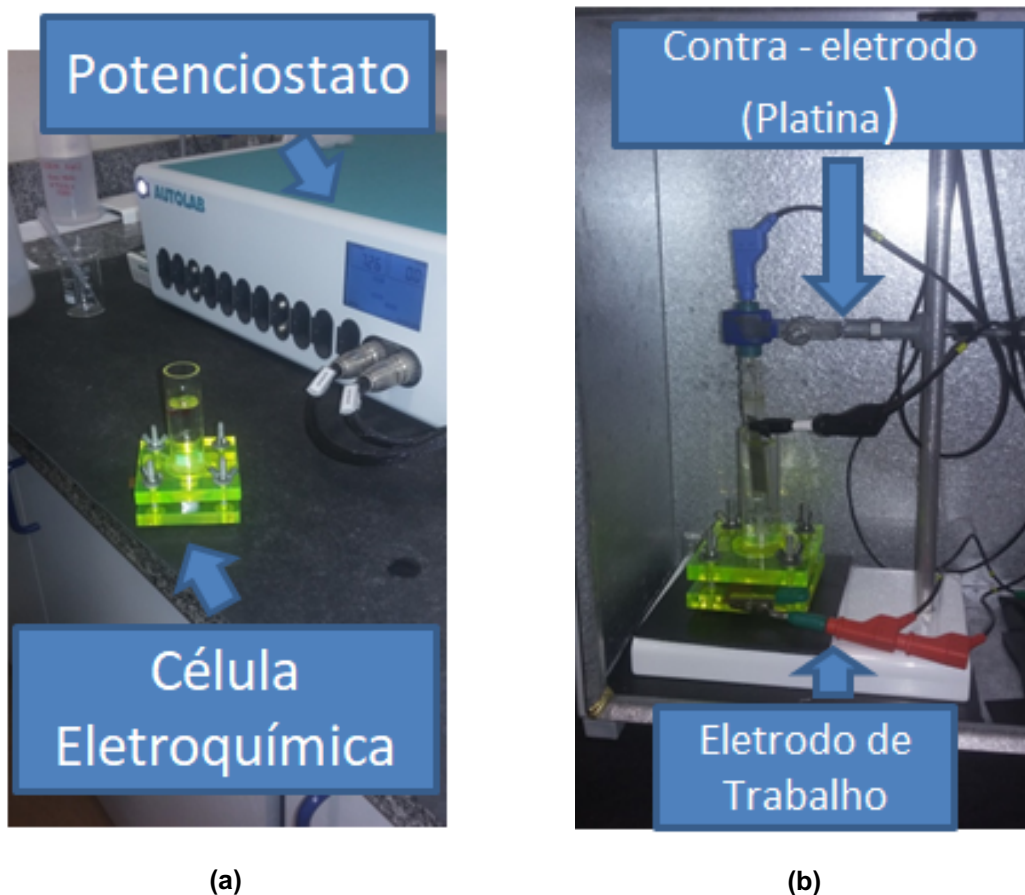


Figura 23: (a) corpo de prova montado na célula de ensaio, (b) célula montada e conectada aos eletrodos. Fonte: autor (2019)

Na Figura 24 observa-se a célula de prova montada e as regiões a serem estudadas localizadas no corpo de prova. Os pontos escolhidos no metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS) foram ensaiados nos corpos de prova soldados pelos processos TIG e MMA em sequência um de cada vez. Após o término de ensaio em um ponto, a célula foi desmontada, o corpo de prova ajustado, célula remontada e conectada aos eletrodos. O objetivo deste ensaio foi estudar o comportamento das regiões citadas em relação à corrosão para estabelecer a correlação entre a microestrutura presente em cada região e a resistência à corrosão.

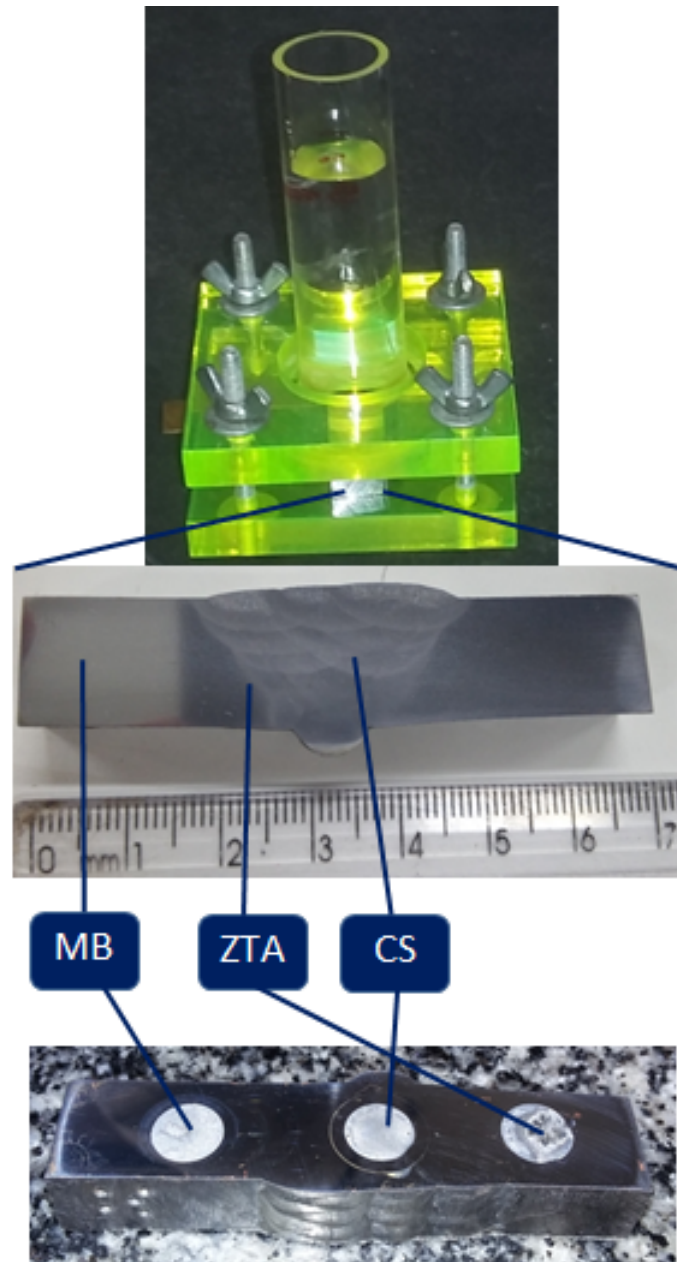


Figura 24: Regiões estudadas para correlação entre microestrutura e resistência à corrosão.

Fonte: autor (2019)

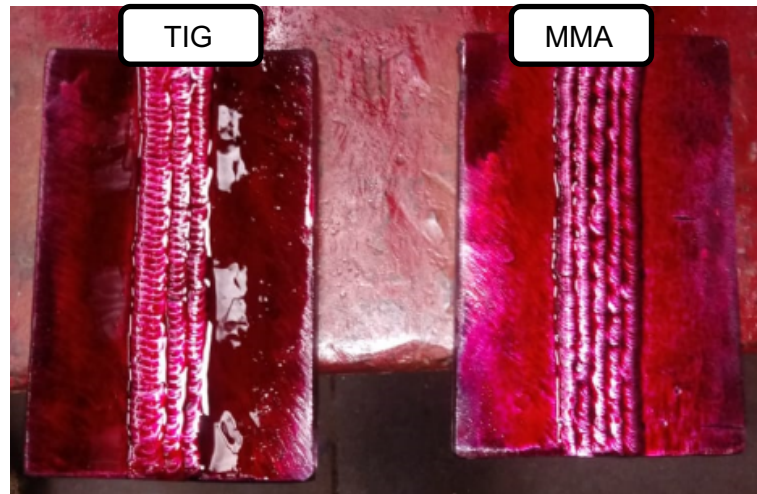
3- RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1- Caracterização da integridade dos cordões de solda

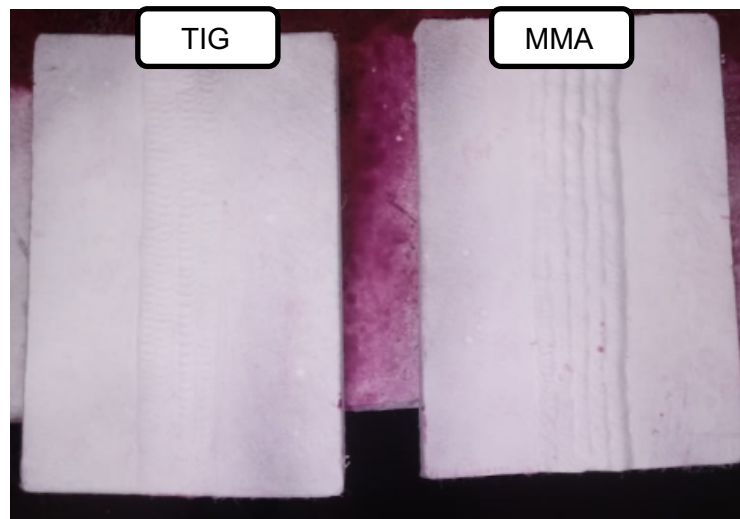
Para a caracterização da qualidade das soldas obtidas pelos processos MMA e TIG foi aplicada a técnica de líquidos penetrantes. O ensaio de líquido penetrante foi escolhido por ser de simples aplicação e de alta efetividade para a detecção de defeitos superficiais que possam comprometer a qualidade da solda. Desta forma pode ser assegurada a qualidade da solda executada em conformidade com o procedimento aplicável.

Portando, na Figura 25, temos as duas principais etapas dos ensaios não destrutivos sendo aplicado nas chapas soldadas pelos processos MMA e TIG. Na Figura 25 (a), verificam-se as chapas soldadas durante aplicação do líquido penetrante em suas superfícies e na Figura 25 (b), as chapas após aplicação do pó revelador e como pode ser claramente observado, não foram encontrados quaisquer defeitos superficiais.

Logo, a conformidade das chapas soldadas, verificada por meio da técnica de líquido penetrante, foi confirmada, ou seja, não foram encontrados poros, trincas ou inclusão de escória, uma vez que tais descontinuidades poderiam comprometer a confiabilidade dos processos de soldagem empregados. Descontinuidades superficiais, tais como poros e trincas são extremamente prejudiciais para a qualidade da solda, pois afetam diretamente a resistência mecânica da junta soldada, podendo levar a rupturas abaixo das tensões projetadas (OKUMURA *et al.* 1982).



(a)



(b)

Figura 25: Qualidade das soldas por líquido penetrante: (a) superfícies com aplicação do líquido penetrante; (b) superfícies com aplicação do pó revelador. Fonte: autor (2019)

3.2- Rugosidade

Os resultados coletados no ensaio de rugosidade são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados do ensaio de rugosidade (Ra μm)

Pontos	Corpos de Prova Soldados							
	MMA 3		MMA 4		TIG 6		TIG 4	
	Trans.	Long.	Trans.	Long.	Trans.	Long.	Trans.	Long.
1	0,30	0,02	0,06	0,03	0,37	0,03	0,03	0,26
2	0,04		0,03	0,02	0,35	0,06	0,02	0,10
3		0,02	0,03		0,13		0,02	0,03
4		0,06	0,05		0,32	0,04	0,13	0,16
5		0,02	0,04	0,11	0,15	0,04	0,02	0,20

A partir dos dados pode ser observado que a rugosidade superficial nas direções (transversal e longitudinal) atingiu os níveis mínimos requisitados pela norma ASTM E384 para a realização de ensaio de dureza Vickers (HV).

3.3- Dureza: MMA e TIG

Para o ensaio de dureza superficial, os corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG foram preparados superficialmente segundo norma ASTM E384 e ensaiados por dureza Vickers (HV) nas instalações do laboratório TORK. Os ensaios foram realizados nas regiões: metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS).

a- Processo MMA

A dureza ao longo da amostra soldada pelo processo MMA foi determinada mediante ensaios realizados nas regiões de interesse: MB, ZTA e CS. Foram realizados um total de 19 endentações ao longo do corpo de prova, distribuídas no MB, ZTA e CS, deste total, 10 (dez) medidas na face da solda e outras 9 (nove) medidas na raiz da solda, como pode ser observado no mapa da Figura 26.

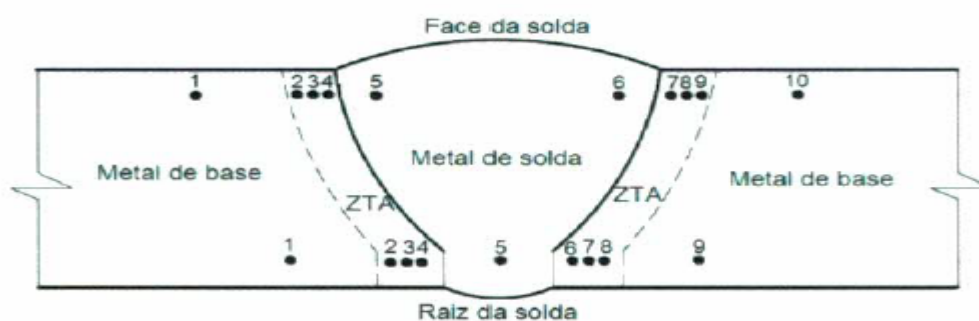


Figura 16: Mapa de endentações de ensaios de dureza em corpo de prova MMA. Fonte: adaptado laboratório Tork (2019)

Na Tabela 5 é possível verificar os resultados experimentais de dureza Vickers para os pontos analisados no corpo de prova soldado pelo processo MMA. As medidas foram executadas na face e na raiz da solda a fim de comparar as propriedades mecânicas nestas áreas, uma vez que a diferença de aporte térmico introduzido nestas regiões durante o processo de soldagem pode levar a mudanças microestruturais que influenciam diretamente nas propriedades (WAINER *et al.* 1992).

Tabela 5: Resultados do ensaio de dureza em corpo de prova MMA (Vickers HV)

Resultados de Dureza Vickers (HV) para Processo MMA			
Pontos	Localização	Face da Solda	Raiz da Solda
1 / 1	MB	145	152
2 / 2	ZTA	152	189
3 / 3	ZTA	169	195
4 / 4	ZTA	174	195
5 / 5	CS	195	213
6	CS	213	-
6	ZTA	-	165
7 / 7	ZTA	195	156
8 / 8	ZTA	201	152
9	ZTA	201	-
9	MB	-	156
10	MB	152	-

Os resultados de dureza (HV) estão representados de forma gráfica na Figura 27, onde podemos observar que o aporte térmico gerado pelo processo de

soldagem nas regiões de face e raiz influencia na dureza. Contudo, os perfis das curvas demonstram que a ZTA é a mais instável quanto a homogeneidade da dureza, como esperado devido ser a região afetada pelo calor induzido da poça de fusão que pode levar a mudanças microestruturais e consequentemente de propriedades. Nas regiões MB e CS temos perfis de maior estabilidade da dureza independente se na face ou raiz da solda.

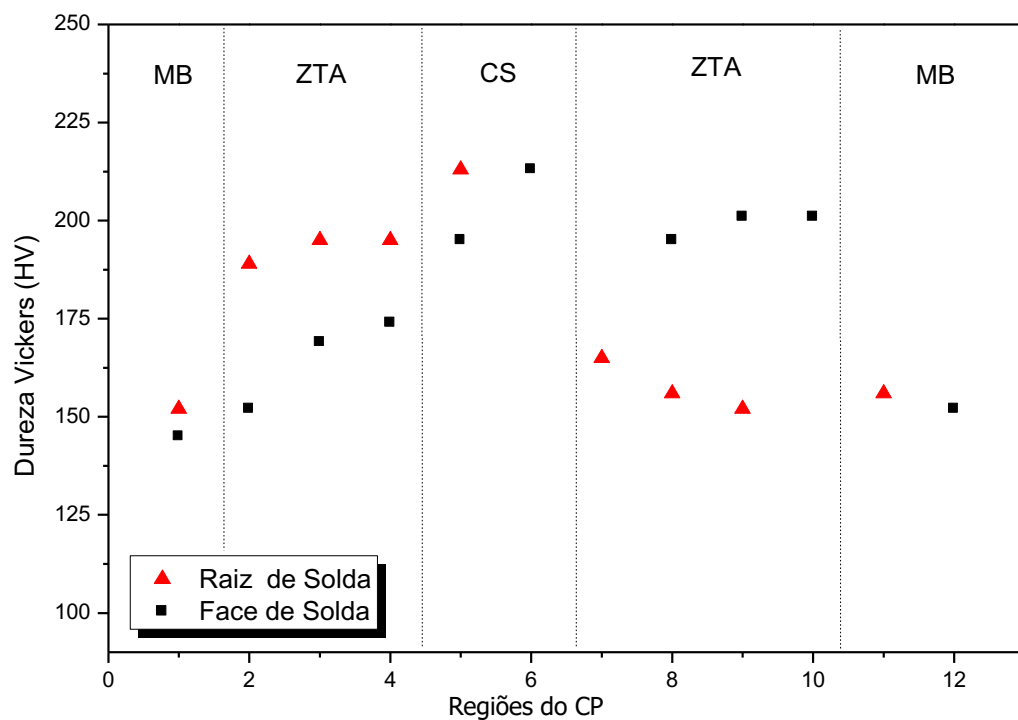


Figura 27: Distribuição de dureza em corpo de prova MMA, dureza vickers (HV). Fonte: autor (2019)

b- Processo TIG

Na Figura 28 é possível verificar o mapeamento do ensaio de dureza no corpo de prova TIG. Foram realizados ensaios em 19 pontos ao longo do corpo de prova, totalizando 10 endentações distribuídos no metal base, cordão de solda e zona termicamente afetada (ZTA), sendo 10 medições na face da solda e 9 medições na raiz da solda. Foram realizadas medições na face e na raiz da solda com o objetivo de comparar as propriedades mecânicas nestas áreas, devido à diferença de aporte térmico introduzido nestas regiões durante o processo de soldagem.

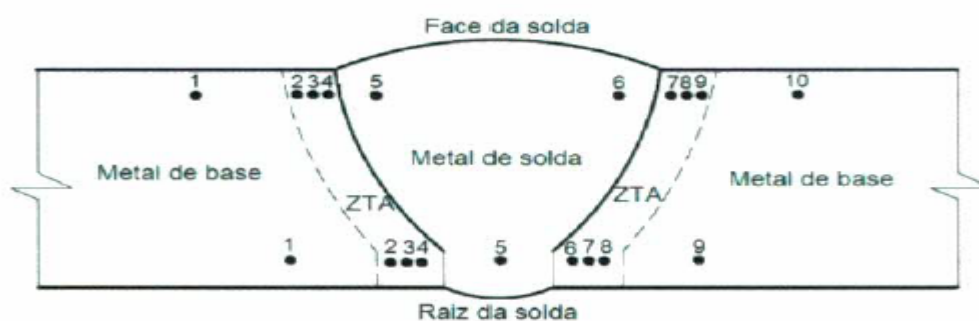


Figura 28: Mapa de endentações de ensaios de dureza em corpo de prova TIG. Fonte: adaptado laboratório Tork (2019)

Na Tabela 6 é possível verificar os resultados experimentais de dureza Vickers para os pontos analisados no corpo de prova soldado pelo processo TIG.

Tabela 6: Resultados do ensaio de dureza em corpo de prova TIG (Vickers HV)

Resultados de Dureza Vickers (HV) para Processo TIG			
Pontos	Localização	Face da Solda	Raiz da Solda
1 / 1	MB	149	145
2 / 2	ZTA	179	156
3 / 3	ZTA	174	152
4 / 4	ZTA	189	161
5 / 5	CS	187	165
6	CS	220	-
6	ZTA	-	156
7 / 7	ZTA	169	165
8 / 8	ZTA	179	165
9	ZTA	169	-
9	MB	-	152
10	MB	156	-

Na Figura 29 verifica-se o mapeamento de durezas medidas sobre o corpo de prova soldado por processo TIG na face e na raiz da solda.

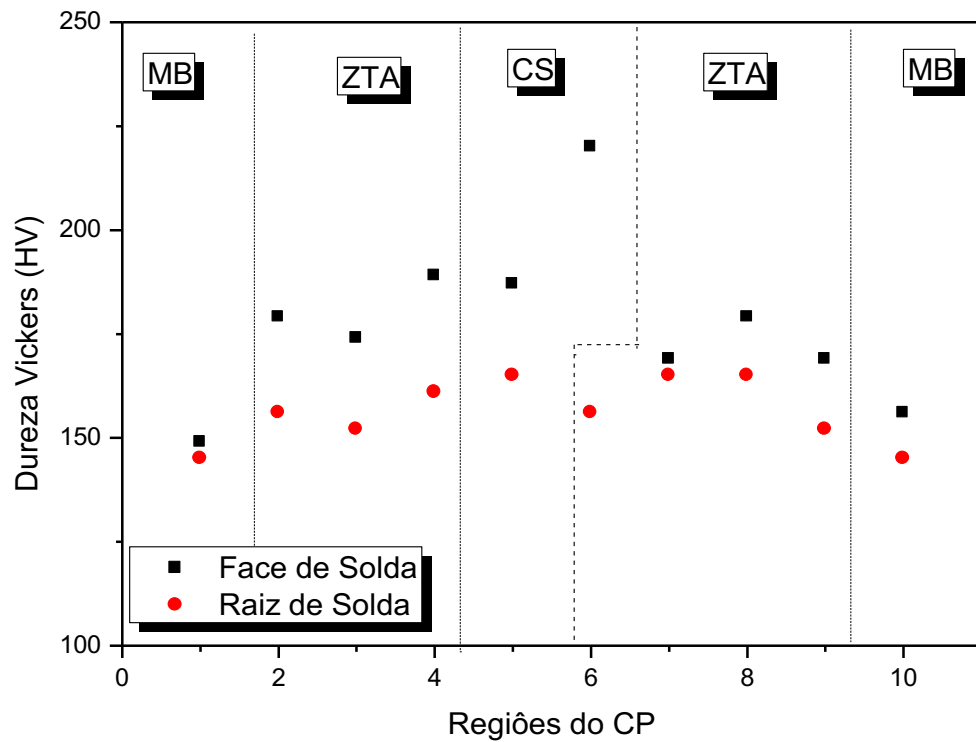


Figura 29: Distribuição de dureza em corpo de prova TIG (Vickers HV). Fonte: autor (2019)

Na Figura 30 pode ser observado o mapeamento de durezas medidas sobre os corpos de prova TIG e MMA na face e na raiz da solda, no qual pode ser notada a mesma tendência de aumento de dureza na ZTA e cordão de solda, quando comparado ao metal de base.

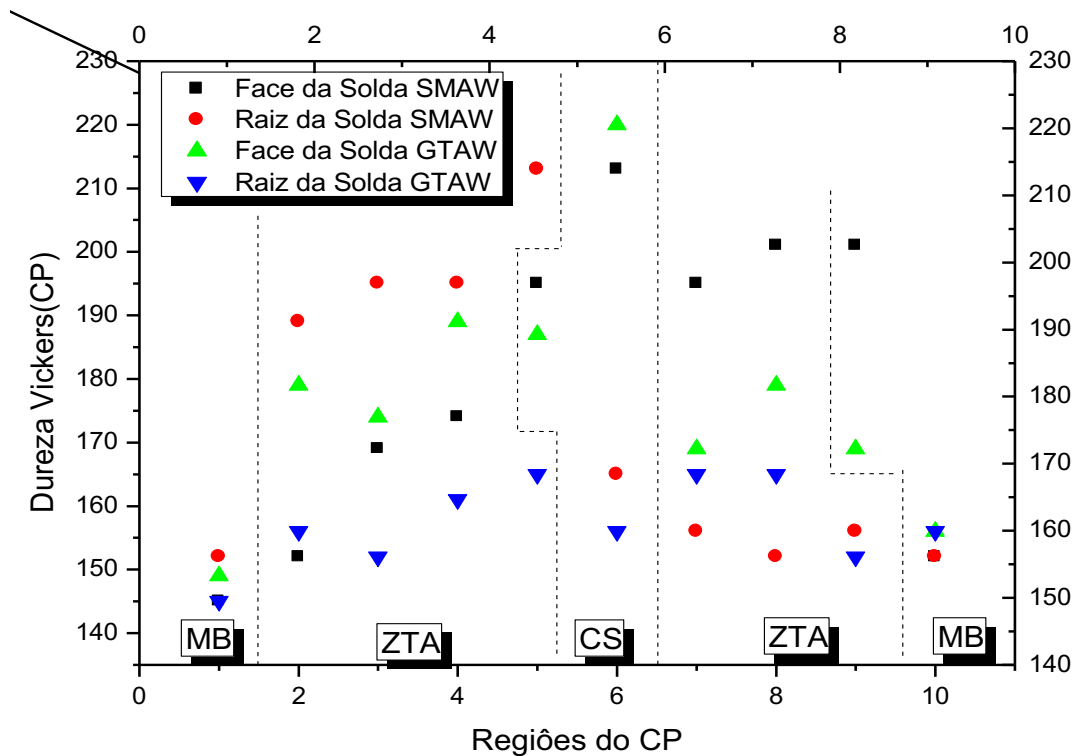


Figura 30: Distribuição comparativa de dureza em corpos de prova MMA e TIG Vickers (HV).

Fonte: autor (2019)

Ensaio complementares foram realizados nos corpos de prova soldados por processos MMA e TIG. Os corpos de prova foram preparados superficialmente e ensaiados (dureza Rockwell B) na Universidade Santa Cecília- Laboratório de Metalografia- em Durômetro HECKERT, esfera de 1/8" carga principal de 100Kgf, e os resultados coletados são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Resultados do ensaio de dureza complementar (Rockwell B)

Processos de soldagem				
Pontos de análise	TIG 4	TIG 6	MMA 4	MMA 3
Metal Base	66	67	70	66
ZTA	72	74	79	73
Cordão de Solda	81	80	85	85
ZTA	75	76	76	70
Metal Base	73	68	67	70

Na Figura 31 pode ser observado o mapeamento de durezas medidas sobre os corpos de prova TIG e MMA na face e na raiz da solda, no qual pode ser notada a mesma tendência de aumento de dureza seguindo sequência: CS > ZTA > MB, a tendência de dureza é a mesma para os dois processos de soldagem analisados.

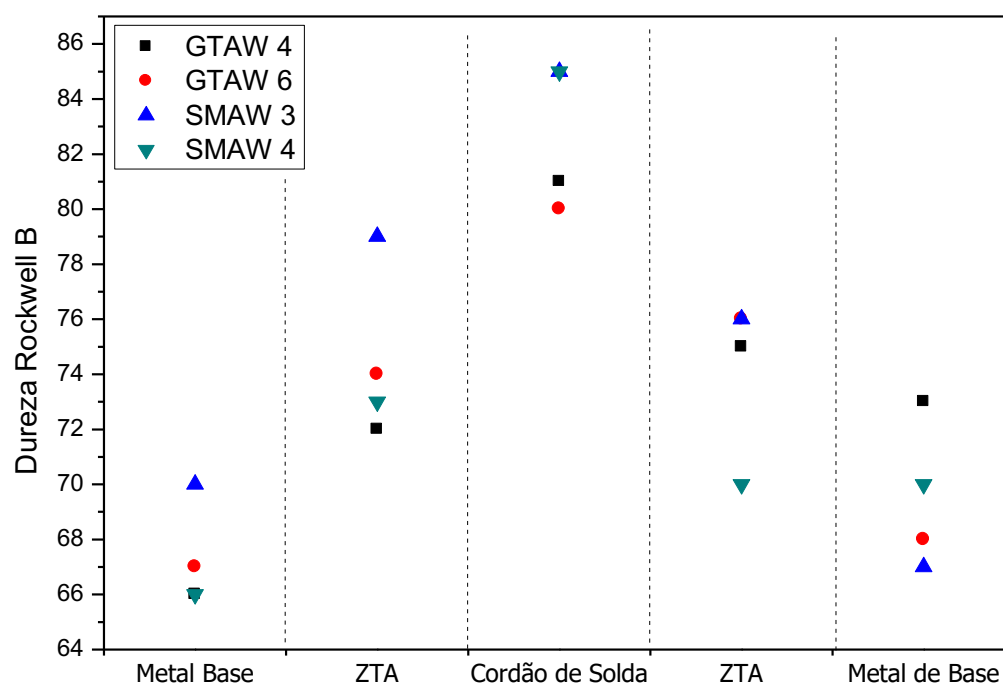


Figura 31: Distribuição comparativa de dureza em corpos de prova MMA e TIG Dureza Rockwell B. Fonte: autor (2019)

Nos processos de soldagem, devido ao ciclo térmico envolvido na área a ser soldada, são formadas diferentes regiões ao longo do cordão de solda. São estas: o cordão de solda ou zona de fusão (CS), onde pode ser observada em pequena escala os fenômenos que normalmente ocorrem durante a solidificação de uma liga metálica, como por exemplo, a nucleação e crescimento de cristais, formação de grãos colunares, segregações e porosidades (Okumura *et al.* 1982), e zona termicamente afetada (ZTA), onde normalmente ocorrem mudanças de fase e portanto mudanças microestruturais importantes que podem levar a precipitação de carbonetos e transformações martensíticas, entre outros. É importante salientar que nos processos de soldagem, é importante manter as características químicas e mecânicas do metal de base, para que sejam preservadas as características estruturais calculadas.

Os resultados dos ensaios de dureza mostram a tendência de maior dureza na ZTA e cordão de solda, quando comparadas ao metal base. Este aumento de dureza se deve às modificações da microestrutura devido ao aporte térmico introduzido durante a soldagem e ao gradiente de perda de calor (ciclo térmico). Durante verificação ao microscópio óptico, foi possível verificar alteração no tamanho de grão na ZTA e cordão de solda, além da presença de microestrutura

com características mecânicas diferentes das do metal de base. No metal de base é possível verificar estrutura bandeada de perlita em ferrita, na ZTA e cordão de solda houve redução de grão.

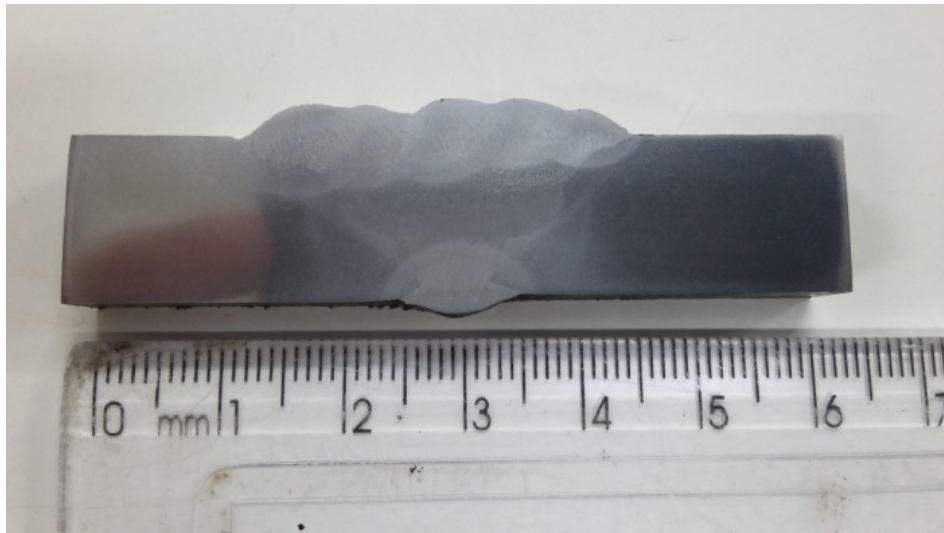
3.4- Caracterização macro e microestrutural dos corpos de prova soldados

Na construção naval a soldagem, em seus diversos processos, é a principal forma de união dos elementos estruturais, elementos estes que, após soldados, deverão suportar as cargas e esforços mecânicos aos quais serão submetidos durante a operação e a sua vida útil. Os processos de soldagem implicam em aquecimento localizado intenso em uma área localizada pequena, ou seja, em um ciclo térmico que provoca a formação de regiões específicas com características estruturais particulares devido a este ciclo térmico. Estas alterações na estrutura do material acarretam alterações nas propriedades mecânicas e, possivelmente, na cinética da corrosão.

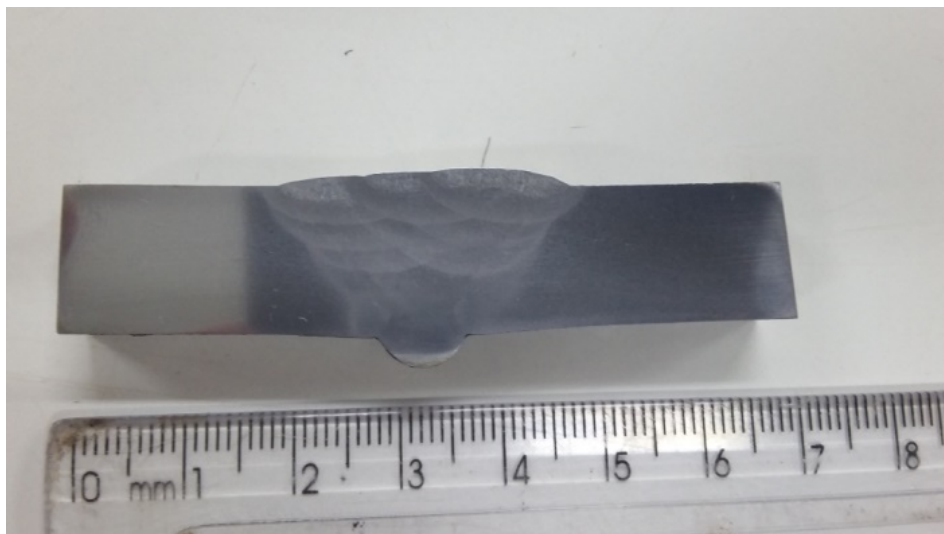
3.4.1- Microestruturas das chapas soldadas: MMA e TIG.

Os corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG foram observados ao microscópio óptico para caracterização metalográfica no Laboratório de Metalografia do Grupo de Pesquisa em Solidificação da UNICAMP/FEM. Foram utilizado Microscópio óptico OLYMPUS GX41, com fonte de luz de 100 W, com auxílio do *software* OLYMPUS Stream Essentials.

Na Figura 32 (a) e (b) verifica-se o corpo de prova soldado por processo MMA e TIG, respectivamente, após ataque com Nital a 5%. É possível observar a zona termicamente afetada e a zona fundida, com os passes de raiz, enchimento e acabamento na face da solda.



(a)



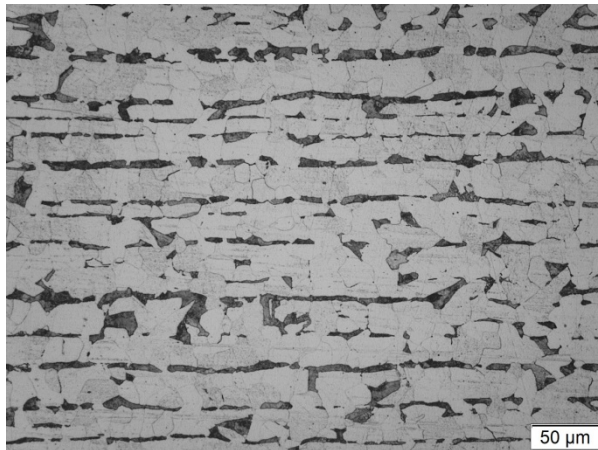
(b)

Figura 32: Macrografias dos Corpos de prova de solda após ataque com Nital 5%: (a) Processo MMA e (b) Processo TIG. Fonte: autor (2019)

3.4.2- TIG – microestrutura do metal de base

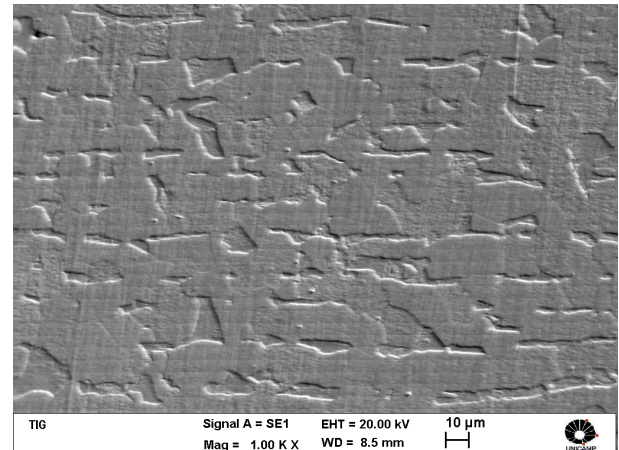
Na Figura 33 (a, b, c, d) são apresentadas as microestruturas de microscópio óptico (MO) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) observadas no metal de base, nos corpos de prova soldados pelo processo TIG.

TIG_Metal Base (MO)

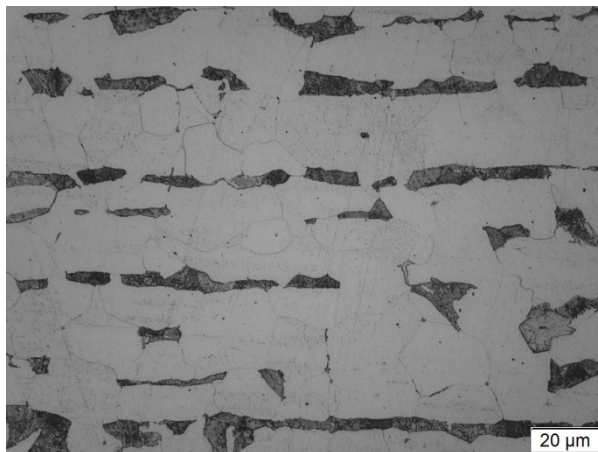


(a)

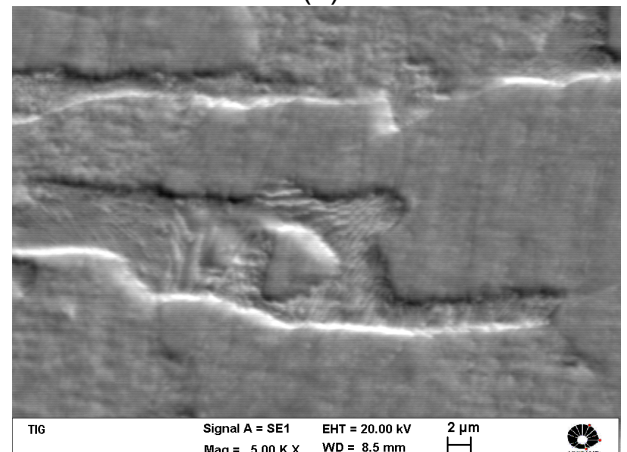
TIG_Metal Base (MEV)



(b)



(c)



(d)

Figura 33: Micrografias do metal de base: MO (a, c) e MEV (b, d). Fonte: autor (2019)

Nas imagens de MO da Figura 33 (a, c) encontramos grãos alongados devido ao processo de laminação da chapa, a partir da qual os corpos de prova foram retirados. É possível notar estruturas bandeadas com presença de grão de perlita e ferrita. A distribuição dos grãos é homogênea e segue a direção de laminação da chapa de aço, com os grãos de perlita deformados no sentido de laminação (região escura), com sua estrutura característica de lamelas de ferrita e cementita. Nas imagens de MEV, Figura 33 (b, d), pode ser observada com melhor detalhe às estruturas constituintes da microestrutura do metal base.

A Figura 33 (d) mostra, em detalhe, as estruturas chamadas de colônias de perlita, lamelas de ferrita e cementita resultante do crescimento cooperativo (COLPAERT 2008). O carbono rejeitado pela formação de ferrita dá origem à cementita (crescimento cooperativo), que tem por característica ser rica em carbono.

Isto explica a maior dureza da perlita, e sua baixa plasticidade e tenacidade (SILVA *et al.* 2010).

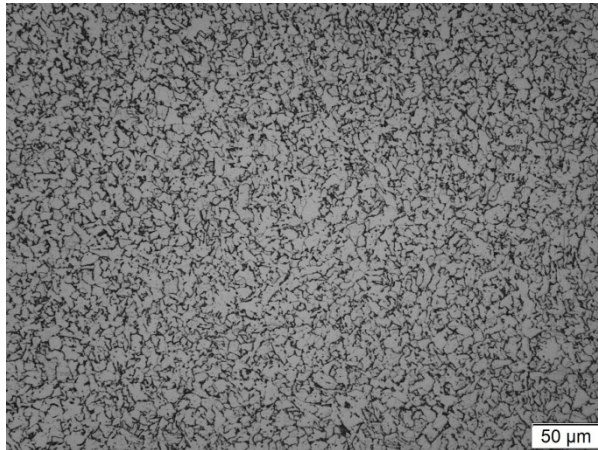
Segundo Nasser *et al.* (2003), a ferrita possui menor resistência e dureza, contudo, maior plasticidade e tenacidade. O processo de formação da ferrita se dá por difusão e varia em função da taxa de resfriamento (SILVA *et al.* 2010). O resfriamento rápido devido ao intenso ciclo térmico observado nos cordões de solda propicia a formação de ferrita em forma de ripas (*lath*) ou placa alongada (*plate*) nucleada no contorno e no interior do grão austenítico. A perlita tem como características maior dureza e resistência, mas baixa plasticidade e tenacidade.

Em seu trabalho, Nasser *et al.* (2003) ainda observam que a orientação de perlita em forma de faixas escuras é encontrada na direção de laminação da chapa, enquanto em outras direções a disposição de perlita não é uniforme.

3.4.3- TIG- microestrutura do cordão de solda

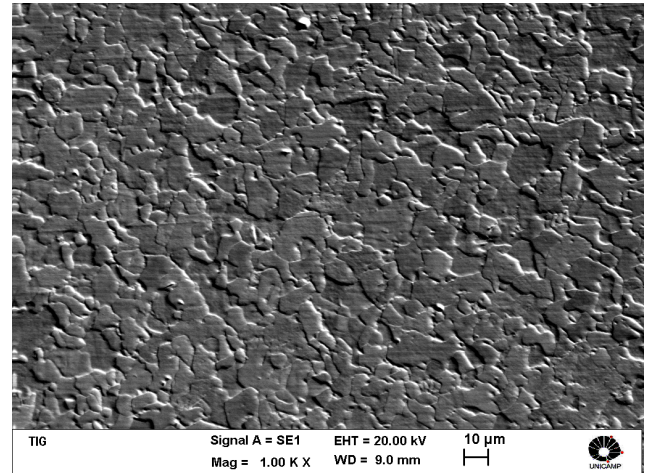
Nas Figuras 34 (a, b, c, d) são apresentadas as microestruturas de microscópio óptico (MO) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) observadas no cordão de solda, nos corpos de prova soldados pelo processo TIG.

TIG_Cordão de Solda (MO)

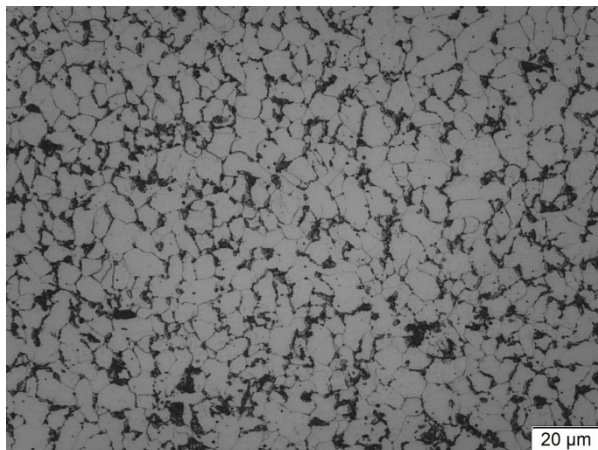


(a)

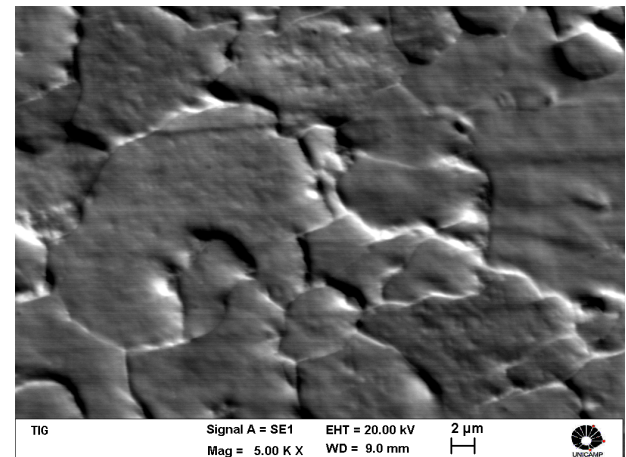
TIG_Cordão de Solda (MEV)



(b)



(c)



(d)

Figura 34: Micrografias do cordão de solda: MO (a, c) e MEV (b, d). Fonte: autor (2019)

Nas Figuras 34 (a) e (c), geradas a partir de observações ao microscópio óptico, nota-se que houve alteração na microestrutura. Os grãos apresentam-se mais refinados, quando comparados ao metal base. Também é possível observar ligeira esferoidização da perlita e ferrita. Não é mais observada a estrutura de perlita fina e ferrita equiaxial (COLPAERT 2008). É observada a presença de ferrita alotriomórfica nos contornos de grão (BADHESHIA *et al.* 1993). Também é possível notar leve esferoidização da perlita e ferrita (COLPAERT 2008). Isto explica em parte a maior dureza encontrada nesta região. A ferrita alotriomórfica nucleia-se nos contornos de grão da austenita $[\gamma_1]$, com o qual mantém relação de orientação, e cresce em direção a $[\gamma_2]$ sem manter relação de orientação (SILVA *et al.* 2010) e corresponde à ferrita equiaxial e a ferrita pro eutectóide (COLPAERT 2008).

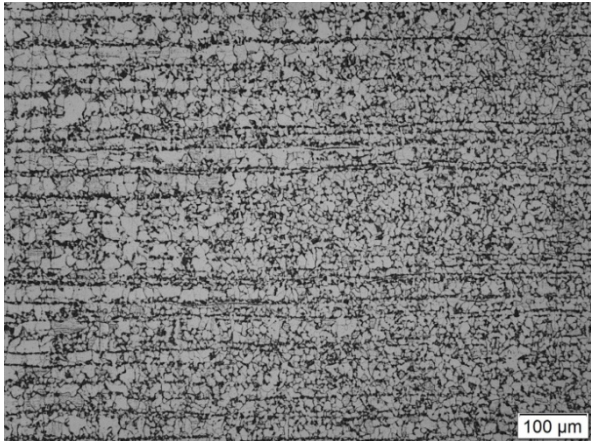
Bhadeshia *et al.* (1993) em seu trabalho informa que a presença de ferrita alotriomórfica propicia a diminuição da tenacidade, implicando a redução na resistência à propagação de trincas por clivagem. Ferrita acicular, de acordo com Bhadeshia *et al.* (1993), é a fase mais comumente observada em transformações austeníticas durante o resfriamento lento de aços baixa liga em zonas fundidas de soldas. Quanto às propriedades mecânicas é considerado de grande importância, pois proporciona boa resistência.

Nas Figuras 34 (b) e (d) obtidas a partir do MEV são observados o cordão de solda. O mesmo padrão de distribuição de grãos pode ser observado, bem como o refino de grãos, com leve esferoidização da perlita e ferrita. Na Figura 33 (d) é possível observar ferrita alotriomórfica no contorno de grão de austenita.

3.4.4- TIG- microestrutura da zona termicamente afetada

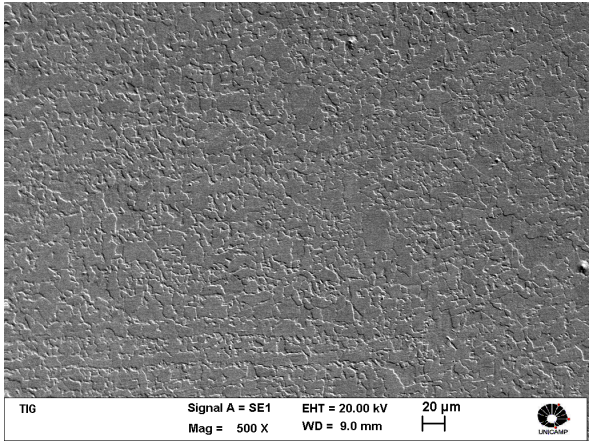
Na Figura 35 (a, b, c, d, e, f) são apresentadas as microestruturas de microscópio óptico (MO) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) observadas na zona termicamente afetada, nos corpos de prova soldados pelo processo TIG.

TIG_ZTA (MO)

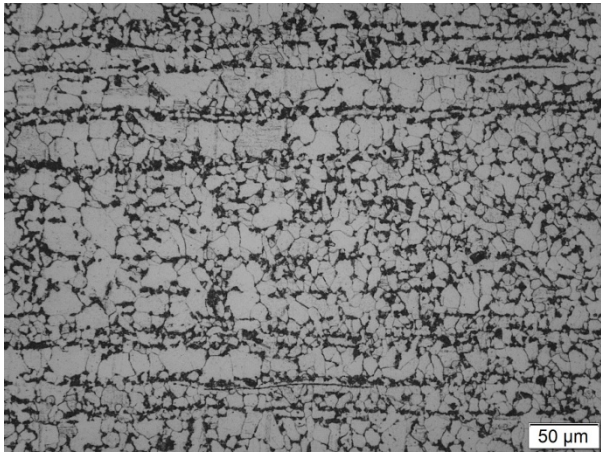


(a)

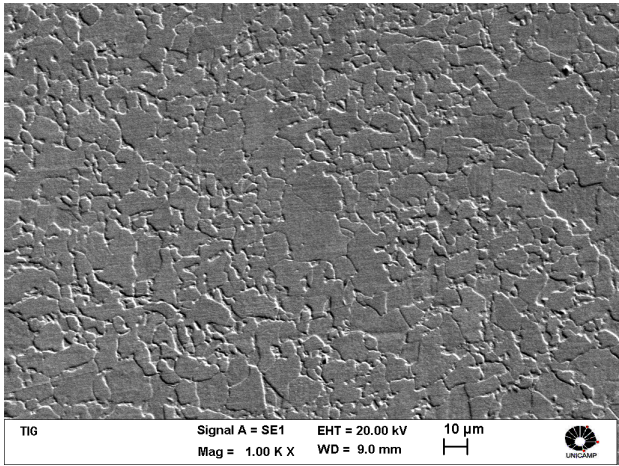
TIG_ZTA (MEV)



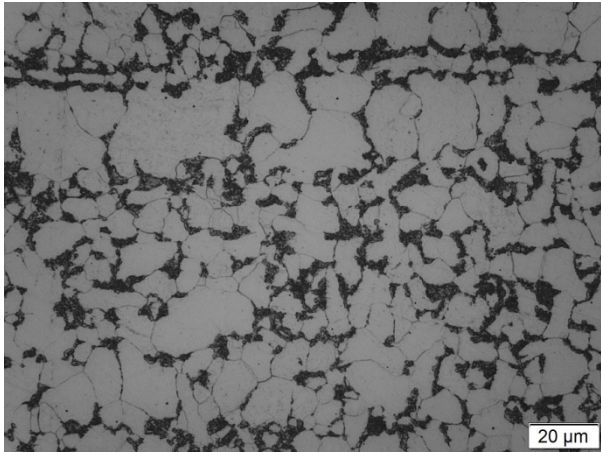
(b)



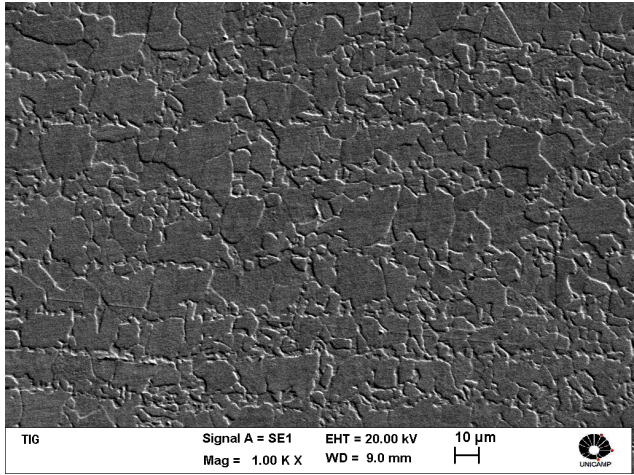
(c)



(d)



(e)



(f)

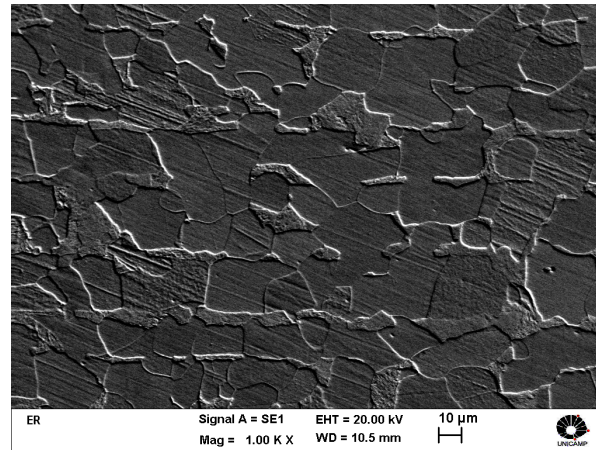
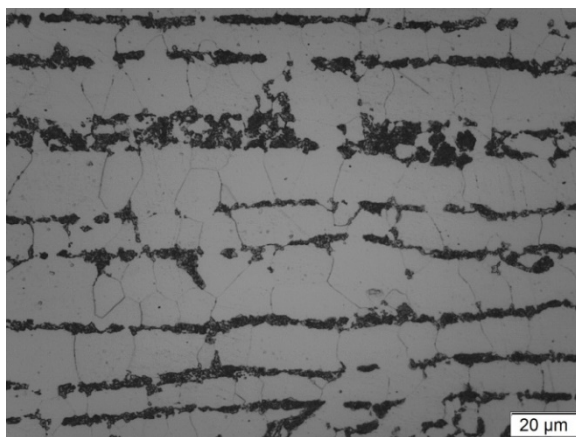
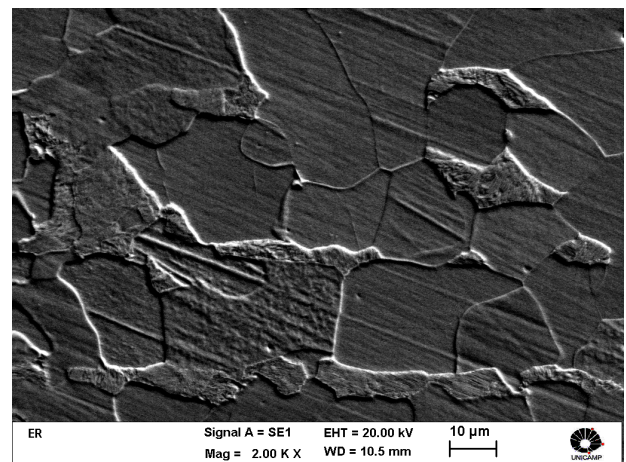
Figura 35: Micrografias da ZTA: MO (a, c, e) e MEV (b, d, f). Fonte: autor (2019)

Nas Figuras 35 (a) e (b), observa-se a ZTA e linha de fusão. Na linha de fusão, as margens da zona termicamente afetada, é possível verificar grãos grosseiros formados, precedidos por região com grãos mais refinados, correspondendo a maior dureza detectada nesta área. Apesar do grão refinado, não é possível observar mudanças significativas na estrutura, logo, encontramos perlita e ferrita levemente esferodizadas.

Na Figura 35 (c) é possível observar a região de granulação grosseira, que corresponde à região do metal base aquecida acima da temperatura de crescimento de grão (1200°C), e que possui microestrutura caracterizada pelo elevado tamanho de grão austenítico e microestrutura final resultante da decomposição da austenita (CHUJUTALLI 2017). A região de grão grosseiro se encontra na ZTA, na fronteira da zona fundida e a região de grão mais finos observada na Figura 35 (d), e está submetida a temperaturas de pico ($\sim 1200^{\circ}\text{C}$ e A_3 – temperatura de início de formação da austenita) e se caracteriza pela estrutura refinada de grãos. Na Figura 35 (f) observa-se a presença de ferrita alotriomórfica no contorno de grão da austenita.

3.4.5- MMA- microestrutura do metal base

Na Figura 36 (a, b, c, d) são apresentadas as microestruturas de microscópio óptico (MO) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) observadas no metal de base, nos corpos de prova soldados pelo processo MMA.

MMA_Metal de Base (MO)**(a)****MMA_ZTA (MEV)****(b)****(c)****(d)****Figura 36: Micrografias do metal de base: MO (a, c) e MEV (b, d). Fonte: autor (2019)**

Nas Figuras 36 (a) e (c) observam-se os grãos conformados com orientação de laminação da chapa a partir da qual os corpos de prova foram retirados. É possível notar estrutura bandeada com presença de grão de perlita e ferrita equiaxial.

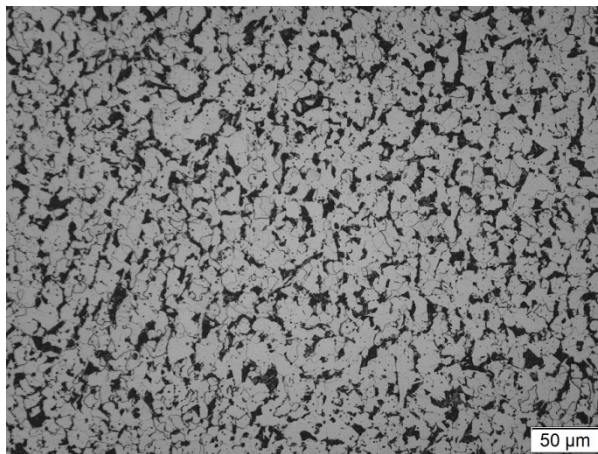
Na Figura 36 (b) e observam-se as estruturas de perlita, com as lamelas de ferrita em cementita, quando observadas no MEV.

Na Figura 36 (d) observa-se grãos de perlita e ferrita em detalhes. Na Figura 36 (c) é possível observar distribuição bandeada de grãos de ferrita equiaxial e perlita fina (COLPAERT 2008).

3.4.6- MMA- microestrutura do cordão de solda

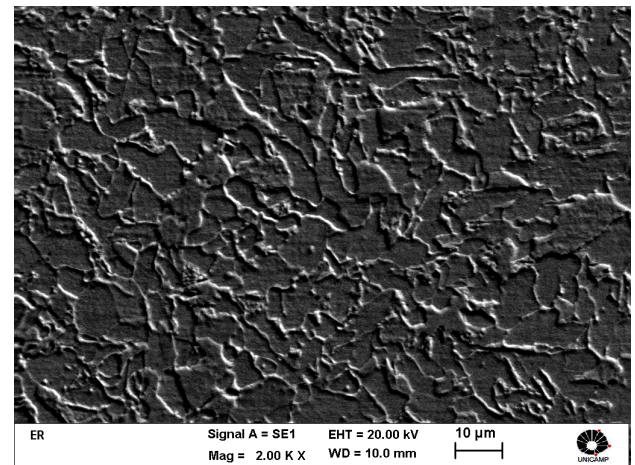
Na Figura 37 (a, b, c, d) são apresentadas as microestruturas de microscópio óptico (MO) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) observadas no cordão de solda, nos corpos de prova soldados pelo processo MMA.

MMA_ Metal de Base (MO)

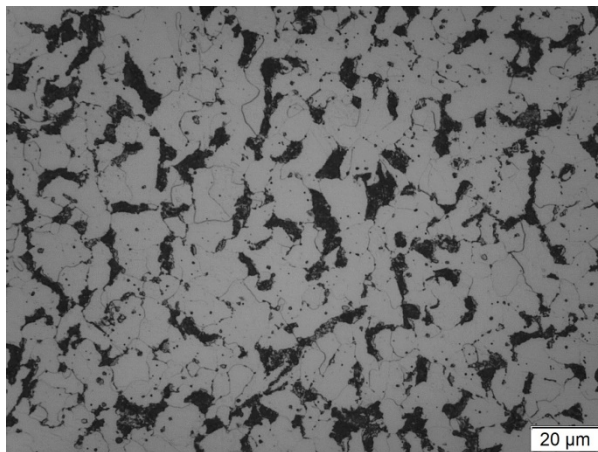


(a)

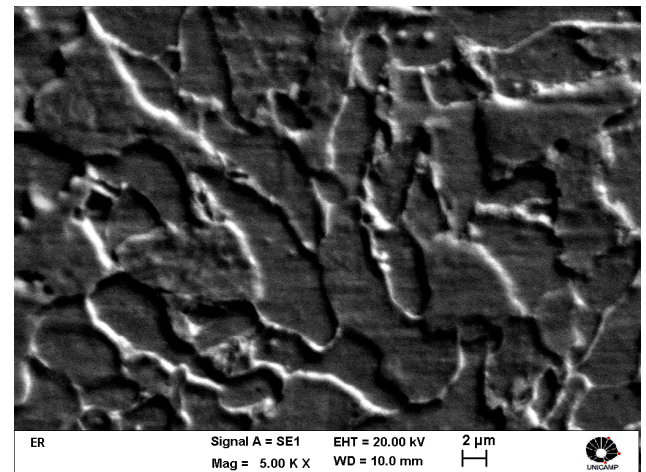
MMA_ Metal de Base (MEV)



(b)



(c)



(d)

Figura 37: Micrografias de cordão de solda: MO (a, c) e MEV (b, d). Fonte: autor (2019)

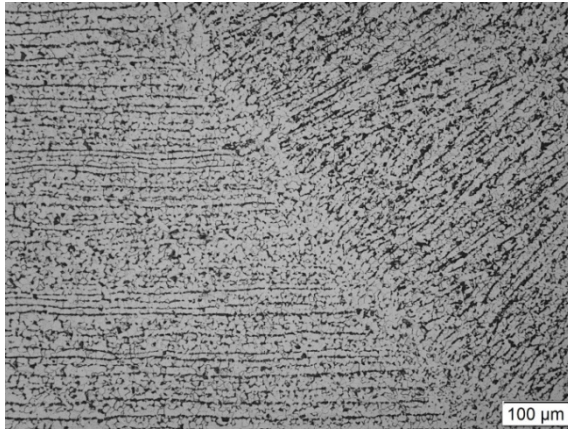
Nas imagens da Figuras 37 (a) e (c) são observadas micrografias do cordão de solda ao MO, onde não é mais observada a estrutura de perlita fina e ferrita equiaxial. É observada a presença de ferrita alotriomórfica nos contornos de grão (BADHESHIA *et al.* 1993) e ferrita intragranular (ZHAO *et al.* 2018). Também é possível notar leve esferoidização da perlita e ferrita (COLPAERT 2008). A ferrita acicular, também observada na microestrutura, proporciona melhores propriedades

mecânicas do que a ferrita bainítica (ZHAO *et al.* 2018). Ainda segundo Zhan *et al.* (2018), a ferrita acicular em soldas se forma a partir de ripas de ferrita que nuclearam a partir de heterogeneidades em pequenas inclusões não metálicas e cresceram em direções diferentes a partir destes pontos de nucleação. Estudos identificaram que os mecanismos de formação da ferrita acicular em soldas são semelhantes ao da bainita, exceto pelas posições de nucleação intragranular. Portanto, a ferrita acicular em soldas é conhecida como bainita nucleada intergranular. Na coluna da direita, Figura 37 (b), observa-se leve esferoidização da perlita e ferrita.

3.4.7- MMA- microestrutura da zona termicamente afetada

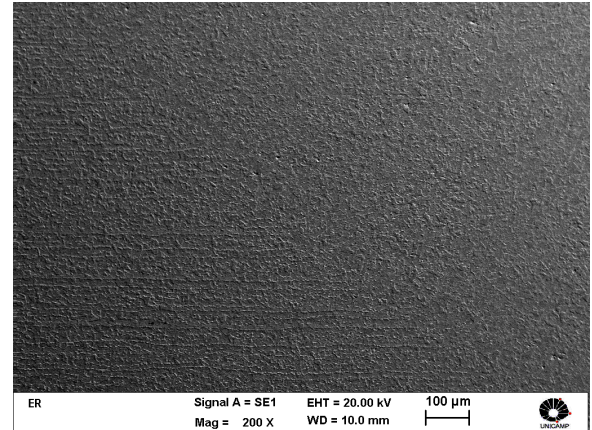
Na Figura 38 (a, b, c, d) são apresentadas as microestruturas observadas ao microscópio óptico (MO) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) observadas na zona termicamente afetada, nos corpo de prova soldado pelo processo MMA.

MMA_ZTA (MO)

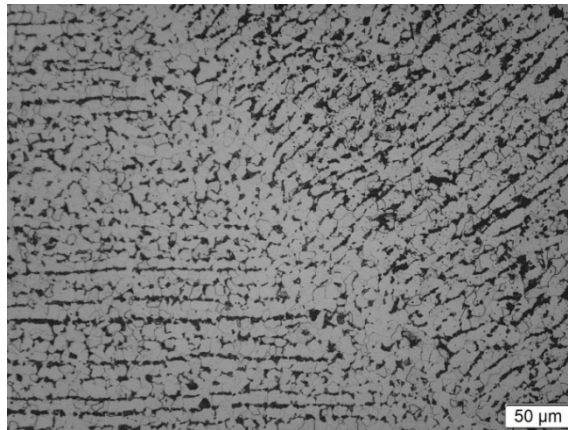


(a)

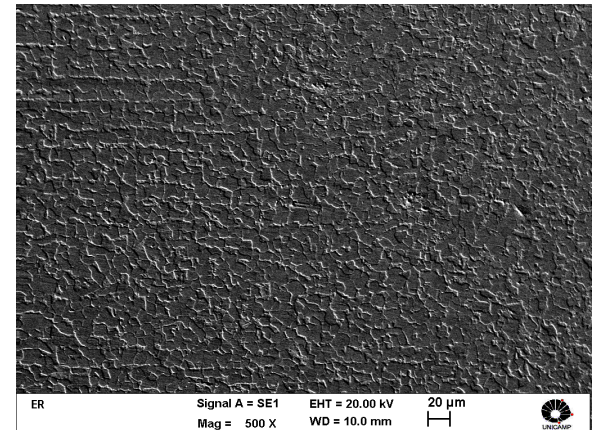
MMA_ZTA (ME)



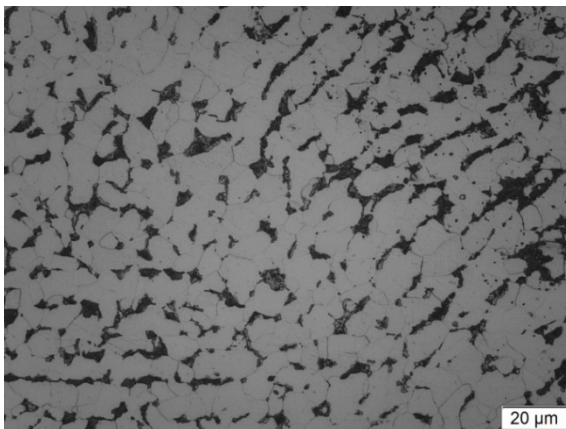
(b)



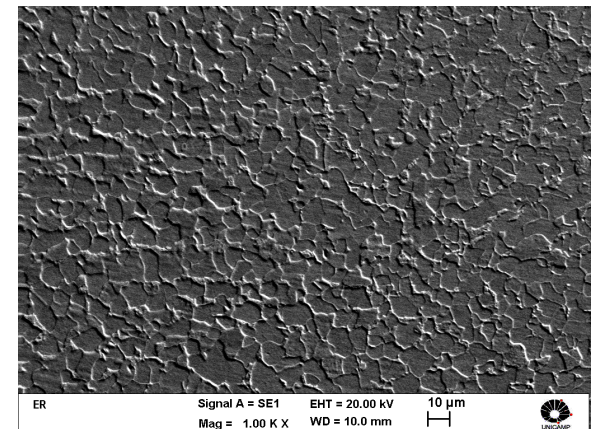
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 38: Micrografias da ZTA: MO (a, c, e) e MEV (b, d, f). Fonte: autor (2019)

Nas Figuras 38 (a, c, e), observam-se a ZTA e linha de fusão. Nas proximidades da linha de fusão, é possível verificar região na qual houve pequeno crescimento de grão, e em seguida, região com grãos refinados. Na região de transição ainda é possível notar a presença de ferrita acicular e alotriomófica nos contornos de grão e ferrita intragranular. Yan *et al.* (2017) em seu trabalho informa que em soldas de multipasses, o cordão subsequente irá reaquecer o metal do cordão antecessor, podendo gerar grãos grosseiros na ZTA. O grão grosseiro tende a aumentar a dureza na ZTA. A inibição do crescimento de grão pode amenizar este problema dureza, bem como a formação da ferrita acicular. Os elementos de liga, tais como Ti e Nb são usados para inibir o crescimento de grãos de austenita (YAN *et al.* 2017). Segundo Silva *et al.* (2010), elementos formadores de carbonetos, como titânio, vanádio molibdênio e cromo restringem a formação de austenita, favorecendo a expansão do campo ferrítico. Na ZTA do corpo de prova em análise não foi notado crescimento acentuado de grão na ZTA, mas sim homogeneidade nos grãos da zona fundida e metal base, quando comparados a ZTA. Nas Figuras 38 (c) e (d), observa-se a região de transição do metal base, com sua forma bandeada de ferrita e perlita, e ZTA, com alguns grãos maiores e em seguida grão mais refinados.

3.5 – Ensaio de corrosão eletroquímica de chapas soldadas por MMA e TIG

A avaliação eletroquímica das chapas de aço soldadas pelos processos de soldagem MMA e TIG foi realizada mediante ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) e polarização linear. Vale enfatizar que os ensaios foram realizados nas regiões de interesse em chapas soldadas, ou seja, os ensaios foram realizados nas regiões: MB, ZTA e CS.

3.5.1- Ensaios eletroquímicos: espectroscopia de impedância eletroquímica e polarização para o processo MMA

As Figuras 39 (a) e (b) representa os resultados de impedância. Na Figura 39 (a) observam-se diagramas de módulo de impedância e ângulo de fase em função da frequência para ensaios realizados em corpo de prova soldado pelo processo MMA para as regiões MB, ZTA e CS. Logo, ao observamos os perfis das curvas,

notamos claramente a semelhança no comportamento eletroquímico entre as 3 regiões analisadas, contudo, para a região de baixas frequências mostram um ligeiro deslocamento entre as curvas, fato que pode ser melhor identificado nos diagramas de *Nyquist* da Figura 39 (b).

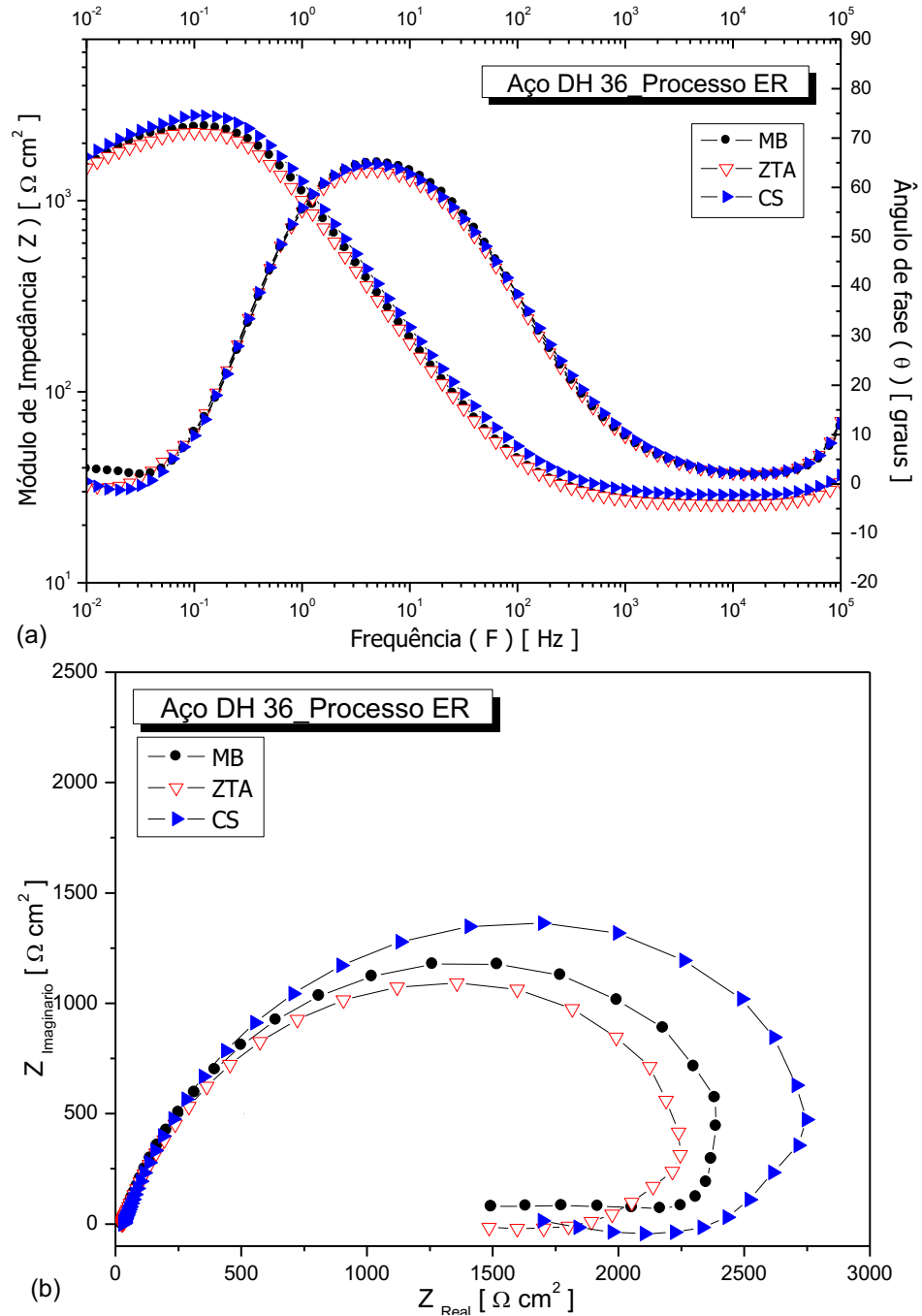


Figura 39: (a) Curva de impedância x frequência para corpo de prova soldado pelo processo MMA e (b) Diagramas de Nyquist para corpo de prova soldado pelo processo MMA. Fonte: autor (2019)

Portanto, na Figura 39 (b) observamos os arcos capacitivos correspondentes a ensaios realizados no MB, ZTA e CS. Os perfis dos arcos indicam uma tendência de maior resistência à corrosão para a região do cordão de solda, uma vez que verificamos na caracterização microestrutural que essa é a região da amostra de maior homogeneidade de grãos, provavelmente influenciando de forma significativa no comportamento eletroquímico.

A curva correspondente à região da ZTA, entre as três regiões estudadas, mostrou-se mais susceptível à corrosão eletroquímica para o processo MMA. De acordo com a caracterização microestrutural na ZTA, foi notada a presença de grãos grosseiros, além de presença de ferrita acicular e alotriomófica nos contornos de grão e ferrita intragranular. De acordo com Gentil (1996), a diferença de tamanho de grãos de um dado metal gera diferença de potencial, como por exemplo, a presença de grãos refinados, que contém energia interna mais alta do que grãos grosseiros. Heterogeneidades, como o encontro entre grãos que geram imperfeições no interior dos cristais, também contribuem para a cinética da corrosão. Na Figura 38 (c) é possível observar a mudança de direção dos grãos. Estruturas formadas nos contornos dos grãos, como ferrita acicular e alotriomófica, também irão influenciar a resistência à corrosão.

Na Figura 40 (a) e (b), observam-se as curvas de polarização potenciodinâmica para o metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS) para o corpo de prova soldado pelo processo MMA. A partir dos perfis das curvas, não é possível de se observar diferenças significativas entre as três (3) regiões ensaiadas e sim apenas um ligeiro deslocamento da curva correspondente à região termicamente afetada para o sentido de maior cinética química, corroborando a tendência mostrada pelos ensaios de impedância eletroquímica para o corpo de prova soldado pelo processo MMA.

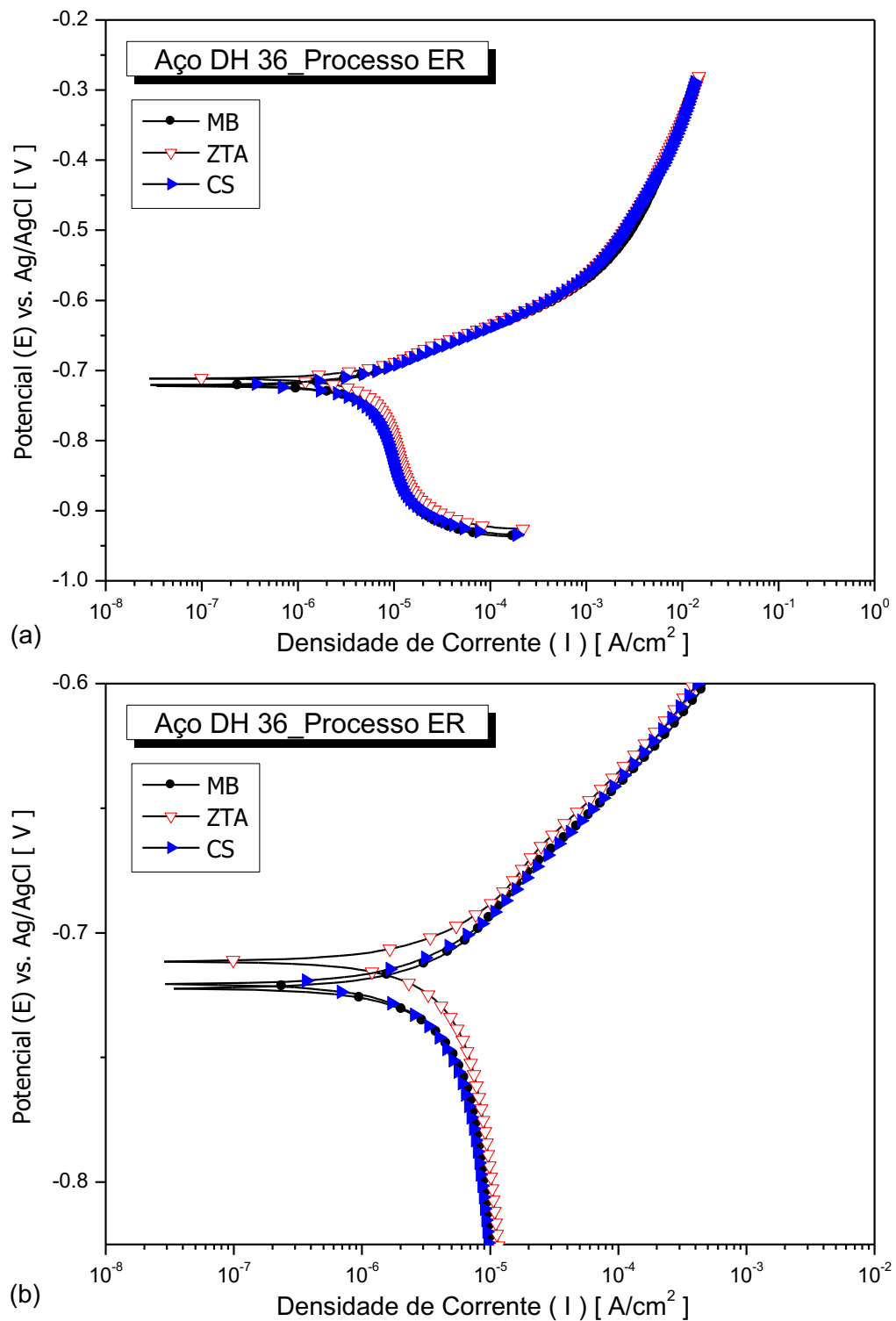
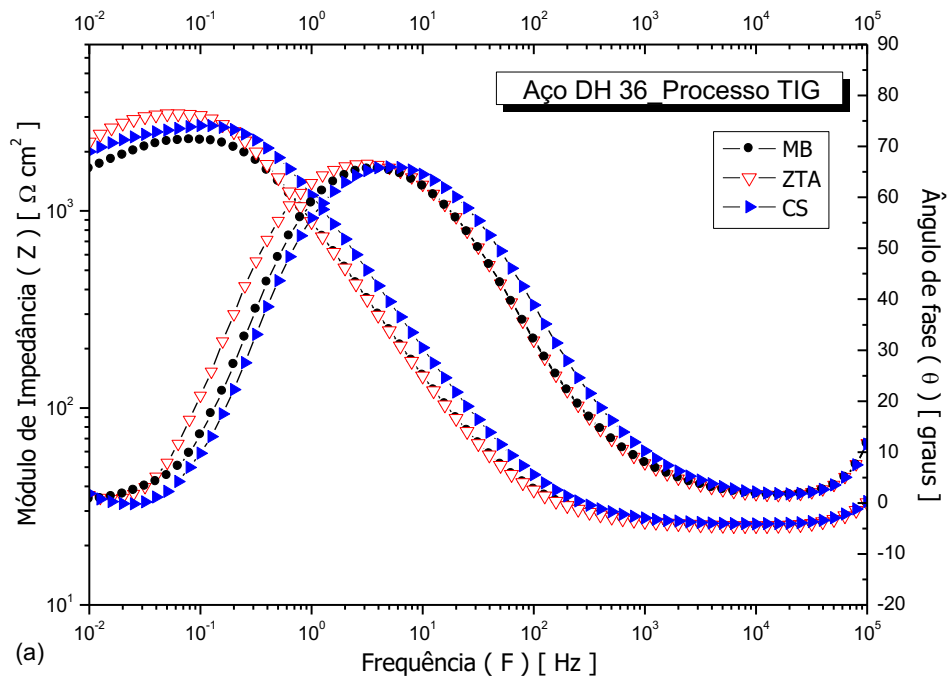


Figura 40: Curvas de polarização potenciodinâmica para as regiões MB, ZTA e CS para corpo de prova soldado pelo processo MMA (a) e em (b) as curvas com aumento das escalas. Fonte: autor (2019)

3.5.2- Ensaios eletroquímicos: espectroscopia de impedância eletroquímica e polarização para o processo TIG

A Figura 41 (a) e (b) representa os resultados de impedância. Na Figura 41 (a) observam-se diagramas de módulo de impedância e ângulo de fase em função da frequência para ensaios realizados em corpo de prova soldado pelo processo TIG para as regiões MB, ZTA e CS. Logo, ao observamos os perfis das curvas, verifica-se claramente a semelhança no comportamento eletroquímico entre as três (3) regiões analisadas, contudo, para a região de médias e baixas frequências mostram um ligeiro deslocamento entre as curvas, fato que pode ser melhor identificado nos diagramas de *Nyquist* da Figura 41 (b).



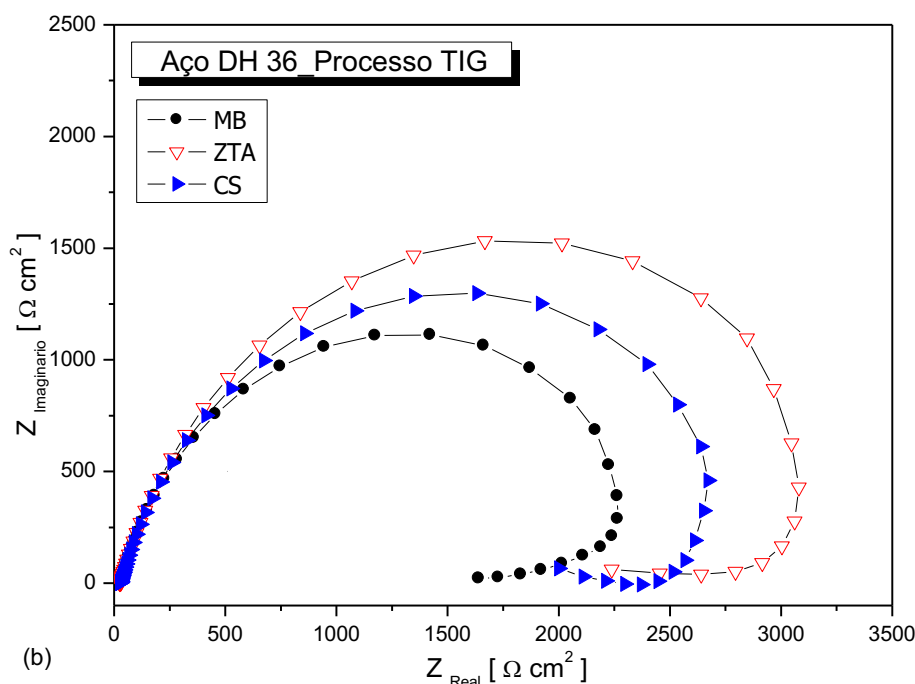
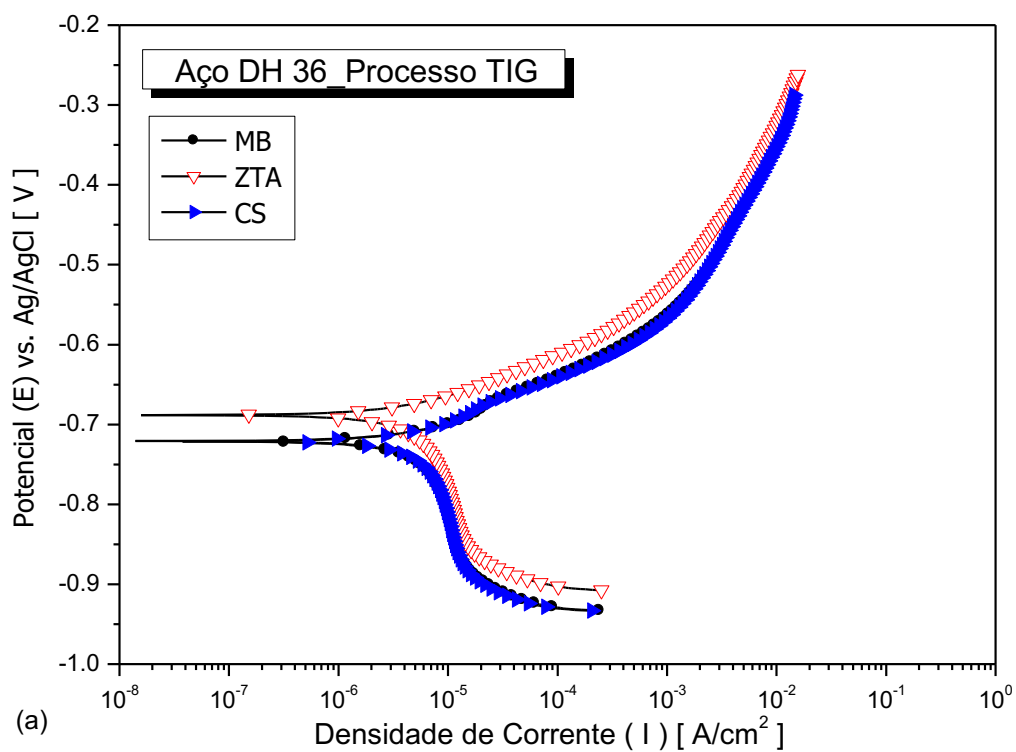


Figura 41: (a) Curva de impedância x frequência para corpo de prova soldado pelo processo TIG e (b) Diagramas de Nyquist para corpo de prova soldado pelo processo TIG. Fonte: autor (2019)

Na Figura 41 (b) observamos os arcos capacitivos correspondentes a ensaios realizados no MB, ZTA e CS. Os perfis dos arcos indicam uma tendência de maior resistência à corrosão para a região da zona termicamente afetada, uma vez que verificamos na caracterização microestrutural que essa é a região da amostra de maior homogeneidade de grãos, provocando melhor distribuição de fases que poderiam ser deletérias para a resistência à corrosão, desta forma, como resultado de um maior controle térmico do processo de soldagem pelo processo TIG, temos uma microestrutura de grãos mais homogênea e significativa maior resistência à corrosão. Contrário ao apresentado pela amostra soldada pelo processo MMA, onde a curva correspondente à região da ZTA mostrou-se mais susceptível à corrosão eletroquímica para o processo MMA.

No CS nota-se que houve alteração na microestrutura se comparada ao metal de base. Os grãos apresentam-se mais refinados, quando comparados ao metal base. Também é possível observar ligeira esferoidização da perlita e ferrita. Não é mais observada a estrutura de perlita fina e ferrita equiaxial, conforme observado nas Figuras 36 (a) e (c). A estrutura cristalográfica do cordão de solda apresenta-se mais homogênea quando comparada ao metal de base, que possui estrutura bandada de ferrita e perlita, explicando sua maior resistência à corrosão.

Nas Figuras 42 (a) e (b), observam-se as curvas de polarização potenciodinâmica para o metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS) para o corpo de prova soldado pelo processo TIG. A partir dos perfis das curvas, não é possível de se observar diferenças significativas entre as três (3) regiões ensaiadas e sim apenas um ligeiro deslocamento da curva correspondente à região termicamente afetada para potencial mais eletropositivo, corroborando a tendência mostrada pelos ensaios de impedância eletroquímica para o corpo de prova soldado pelo processo TIG.



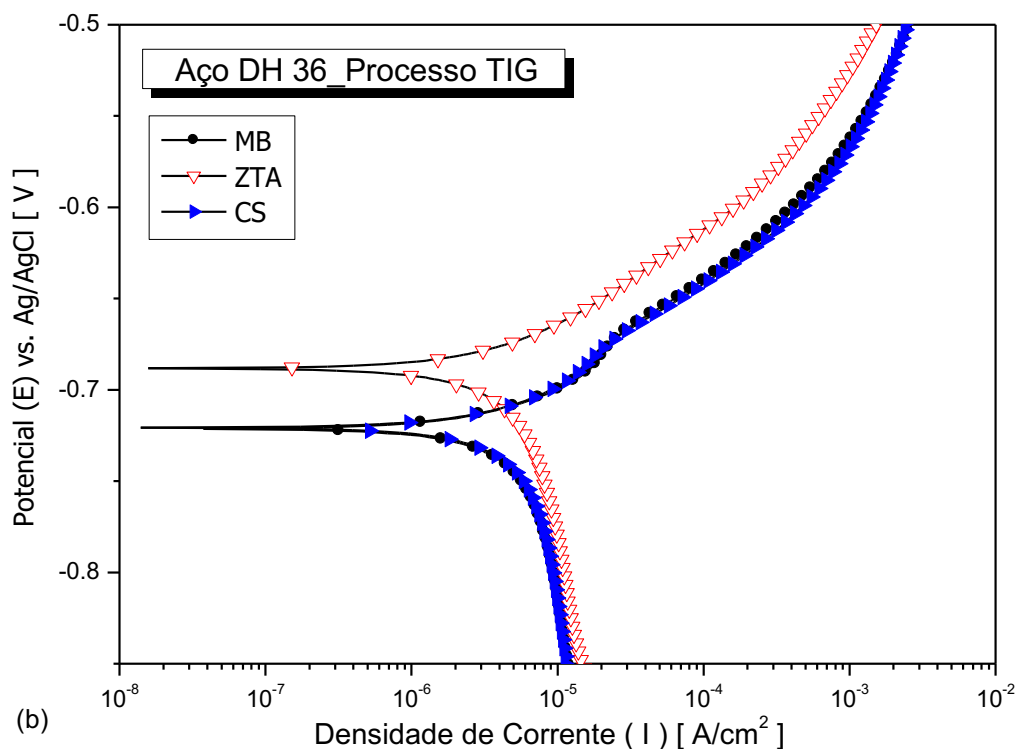


Figura 42: Curvas de polarização potenciodinâmica para as regiões MB, ZTA e CS para corpo de prova soldado pelo processo TIG (a) e em (b) as curvas com aumento das escalas. Fonte: autor (2019)

3.5.3- Análise comparativa na ZTA dos corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG

As Figuras 43, 44 e 45 mostram curvas dos ensaios eletroquímicos para análises comparativas entre as ZTAs dos corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG. Como foi verificado ao longo do trabalho, a ZTA se destacou como a região, dentre as investigadas (MB, ZTa e CS), de maior suscetibilidade a interferências da microestrutura, possibilitando, portanto, uma correlação entre microestrutura e efeitos avaliados como dureza e resistência à corrosão.

Na Figura 43 observam-se as curvas do diagrama de *Nyquist*, nas quais nota-se a maior tendência de resistência à corrosão na ZTA do corpo de prova soldado pelo processo TIG em relação à região ZTA do corpo de prova soldado pelo processo MMA. Provavelmente, esta característica se deve à maior homogeneidade observada na microestrutura da ZTA obtida pelo processo de soldagem TIG, onde tem-se maior controle dos parâmetros de soldagem e consequentemente, maior homogeneidade microestrutural.

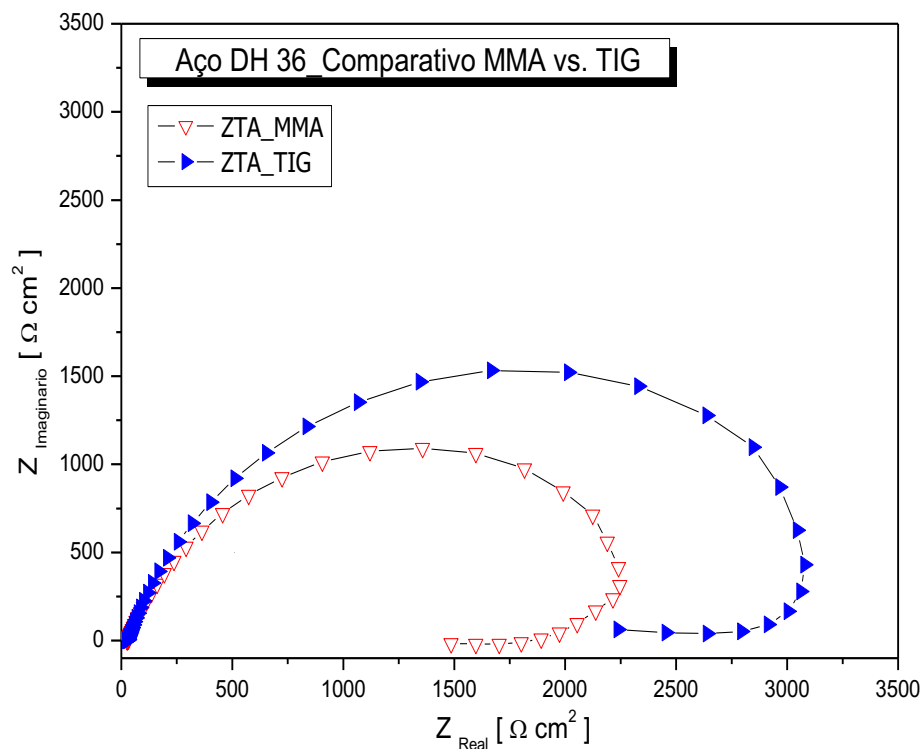


Figura 43: Comparação entre os diagramas de Nyquist na ZTA para corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG na ZTA. Fonte: autor (2019).

Na Figura 44 observa-se a comparação entre as curvas de bode e ângulo de fase em função da frequência na região da ZTA para corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG. Nas regiões de menor frequência, nota-se maior impedância para a ZTA da amostra TIG, ou seja, tendência de maior resistência à corrosão para o processo que proporciona maior homogeneidade microestrutural e consequentemente, maior homogeneidade de propriedades mecânicas. Quantitativamente podemos observar os valores de impedância, corroborando a tendência citada, ($Z_{\text{TIG}} = 2.239 \Omega \cdot \text{cm}^2$ e $Z_{\text{MMA}} = 1.485 \Omega \cdot \text{cm}^2$).

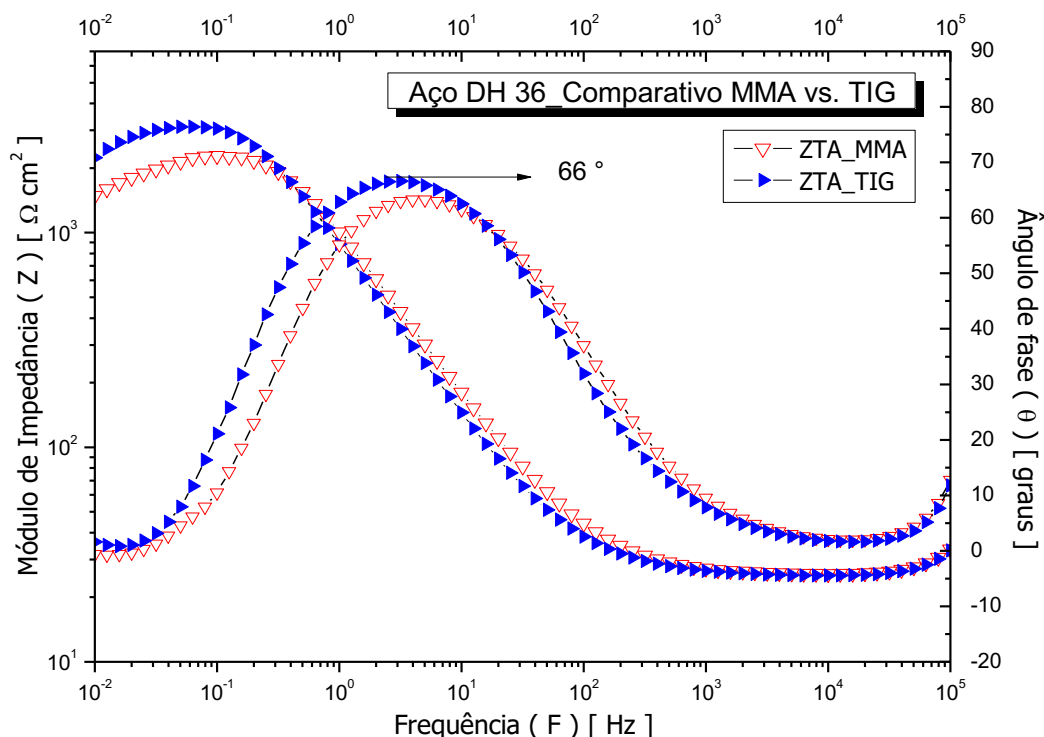


Figura 44: Comparação entre as curvas de impedância x frequência na ZTA para corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG. Fonte: autor (2019)

Na Figura 45 se observam curvas de polarização potenciodinâmica para a zona termicamente afetada (ZTA) para os corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG. A partir dos perfis das curvas nota-se um ligeiro deslocamento da curva correspondente à região termicamente afetada do corpo de prova soldado pelo processo TIG para potencial mais eletropositivo, corroborando a tendência mostrada pelos ensaios de impedância eletroquímica mostrado na comparação com o processo MMA. Os resultados obtidos por extrapolação de Tafel, apresentados na Figura 45, mostram de forma quantitativa a tendência observada de maior resistência à corrosão da região da ZTA para o corpo de prova soldado pelo processo TIG, uma vez que temos potencial de corrosão ligeiramente mais eletropositivo ($E_{\text{corr}} = -0,691 \text{ V}$) e cinética de corrosão menor ($I_{\text{corr}} = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$).

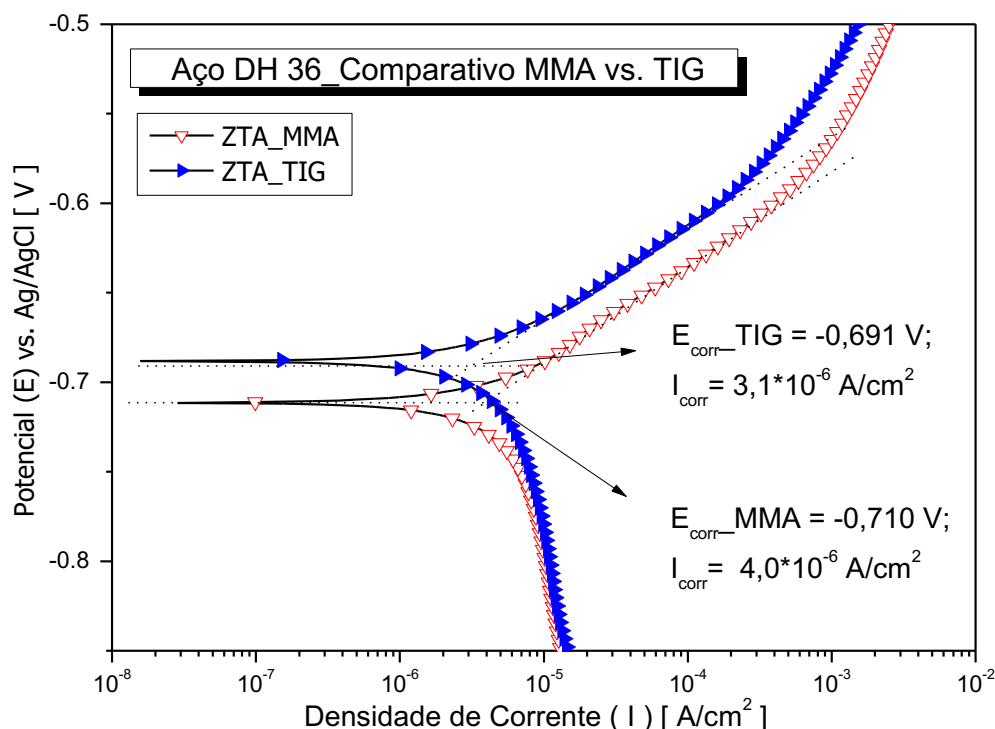


Figura 45: Comparação entre as curvas de polarização potenciodinâmica para a região ZTA para corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG. Fonte: autor (2019)

4 CONCLUSÕES

A partir do desenvolvimento, caracterizações e consulta a literatura, é possível concluir que:

A microestrutura do CS para ambos os processos de soldagem, mostra ligeira esferoidização da perlita e ferrita. Enquanto, o CS do processo MMA mostra, além da ligeira esferoidização da perlita e ferrita, a formação da ferrita acicular que atua aumentando a resistência mecânica do aço. Da mesma forma, a região ZTA mantém similaridade microestrutural, o processo TIG possui características de formação do arco elétrico mais estável quando comparado ao processo MMA refletindo na maior homogeneidade e refinamento dos grãos. Uma vez que essa estabilidade gera maior concentração de calor e consequentemente reduz a área da zona termicamente afetada. O processo MMA apresenta arco elétrico menos estável, logo, estrutura microestrutural menos homogênea e grãos mais grosseiros.

O aporte térmico gerado pelo processo de soldagem nas regiões de face e raiz influencia na dureza. Contudo, os perfis das curvas demonstram que a ZTA é a mais

instável quanto à homogeneidade da dureza, como esperado devido ser a região afetada pelo calor induzido da poça de fusão que pode levar a mudanças microestruturais e consequentemente de suas propriedades. Portanto, com o mapeamento de medidas de dureza em corpos de prova soldados (TIG e MMA) na face e na raiz da solda, podemos notar a mesma tendência de aumento de dureza na ZTA e cordão de solda, quando comparado ao metal de base.

A maior homogeneidade microestrutural se traduz em semelhança no comportamento eletroquímico. Logo, nos resultados de impedância para o processo MMA, a partir dos diagramas de *Nyquist* os arcos indicam uma tendência de maior resistência à corrosão para a região do cordão de solda, uma vez que foi verificado na caracterização microestrutural que essa é a região de maior homogeneidade de grãos, possivelmente influenciando de forma significativa no comportamento eletroquímico. Os dados de polarização mostram que não existe diferença significativa entre as três (3) regiões ensaiadas, mas sim um ligeiro deslocamento da curva correspondente à ZTA para o sentido de maior cinética química, menor resistência à corrosão, corroborando a tendência mostrada pelos ensaios de impedância eletroquímica para o corpo de prova soldado pelo processo MMA.

Os resultados de impedância para o processo TIG, a partir dos diagramas de *Nyquist* os perfis dos arcos indicam uma tendência de maior resistência à corrosão para a região da zona termicamente afetada, como resultado de um maior controle térmico do processo de soldagem pelo processo TIG, temos uma microestrutura de grãos mais homogênea e significativa maior resistência à corrosão. Contrário ao apresentado pela amostra soldada pelo processo MMA, onde a curva correspondente à região da ZTA mostrou-se mais susceptível à corrosão eletroquímica. As curvas de polarização linear não mostram diferenças significativas entre as três (3) regiões ensaiadas e sim apenas um ligeiro deslocamento da curva correspondente à região ZTA para potencial mais eletropositivo, corroborando a tendência mostrada pelos ensaios de impedância eletroquímica.

Portanto, as diferenças de homogeneidade e tamanho de grão das microestruturas resultantes dos processos de soldagem (MMA e TIG), denotam a maior tendência à corrosão eletroquímica. Fica evidente que as microestruturas de grão refinados e homogêneos oferecem propriedades mecânicas superiores, além de melhor resistência à corrosão, quando comparadas às regiões com granulação grosseira e com maior conteúdo de heterogeneidades, que tendem a maior cinética eletroquímica.

4.1 Trabalhos futuros

- Para trabalhos futuros fica a sugestão de realizar ensaios de corrosão para as diferentes regiões de soldagem (MB, ZTA, CS) em função de um maior tempo de imersão de amostras soldadas aplicada na indústria naval.
- Realizar ensaios de impacto em corpos de prova soldados pelos processos MMA e TIG, devidamente padronizados.
- Realizar análise em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e TEM (Microscópio eletrônico de Transmissão) para melhor caracterização das fases deletérias na ZTA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- ALIPOORAMIRABAD Houman, PARADOWSKA Anna, GHOMASHCHI Reza, REID Mark. **Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds.** Journal of Manufacturing Process (2017).
- 2- ASTM A 131 – A 131M - 14: **Standard specification for structural steel for ship.** (2008)
- 3- ASTM E165: **Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination.**
- 4- ASTM E 3 **Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.**
- 5- ASTM E384 – 11: **Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials (2012).**
- 6- ASTM E407-07 **Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.**
- 7- AUNG Htay: **An analysis of the study of mechanical properties and microstructural relationship of HSLA steels used in ship hulls.** World Maritime University Dissertations (2007).
- 8- BHADOSHIA H.K.D.H., SVENSON L. –E. **Modelling the Evolution of Microstructure in Steel Weld Metal.** University of Cambridge. Materials Science and Metallurgy. (1993).
- 9- BHADOSHIA H.K.D.H., SVENSON L. –E. **Strong Ferritic-Steel Welds.** University of Cambridge. Materials Science and Metallurgy. (2007).
- 10-CHEN Shujun, ZHANG Suolai, HUANG Ning, ZHANG Pengtian, HAN Jianchao. **Droplet transfer in arcing wire GTAW.** Journal of Manufacturing Process. (2016).
- 11-CHENG Peng, HUANG Xian-Qiu: **Influence of Temperature on Corrosion Behavior of DH36 Steel in Seawater Full Immersion Zone.** Advanced Materials Research (2015).
- 12-CHUJUTALLI John Alex Hernández: **Modelo Termo-mecânico-metalúrgico de chapa de aço naval DH36 soldada com MAG.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2017).
- 13-COLPAERT Hulbertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** Vilares Metais. Editora Blucher. (2008)
- 14-DNV Det Norske Veritas: **Allowable Thickness Diminution for Hull Structure.** (2013).

- 15-FOWLER Steven, TOUMPIS Athanasios, GALLOWAY Alexander: **Fatigue and bending behavior of frictionstir welded DH 36 steel**. Int J Adv Manuf Technol (2015).
- 16-FUJARRA André Luis Condino: **Especialização em Engenharia Naval – Arquitetura Naval**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. (2006)
- 17-GENTIL Vicente: **Corrosão**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (1996).
- 18-HAYAT Fatih, UZUN Huseyin: **Effect of Heat Treatment on Microstructure, Mechanical properties and Fracture Behavior of Ship and Dual Phase Steels**. Journal of iron and steel research, international. 2011
- 19-HEYER A., D'SOUZA F., MORALES C.F. Leon, FERRARI G., MOL J.M.C., WIT J.H.W. de: **Ship ballast tanks a review from microbial corrosion and electrochemical point of view**. Ocean Engineering (2013).
- 20-JORGE Leandro de Jesus, CÂNDIDO Verônica Scarpini, SILVA Alisson Clay Riosda, FILHO Fabio da Costa Garcia, PEREIRA Artur Camposo, LUZ Fernanda Santos, MONTEIRO Sergio Neves: **Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermally treated HSLA-80 steel**. Journal of Materials research and Technology (2018).
- 21-LI Shuqi, FANG Hongyuan, LIU Xuesong, Wang Wei, Wang Qiang, CUI Wei: **1985. A combined computational and experimental study on vibration stress relief for large welded DH36 steel tube**. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, People's Republic of China (2016).
- 22-NASSER Sai Nemat, GUO Wei Guo; **Thermomechanical response of DH-36 structural steel over a wide range of strain rates and temperatures**. Mechanics of Materials 35 (2003) 1023–1047.
- 23-OKUMURA Toshie, TANIGUCHI Celio: **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. LTC Livros Técnicos e Científicos.Rio de Janeiro. (1982).
- 24-POLEZHAYEVA Helena, TOUMPIS Athanasios I., GALLOWAY Alexander M., MOLTER Lars, AHMAD Bilal, FITZPATRICK Michael E.: **Fatigue performance of friction stir welded marine grade steel**. International Journal of Fatigue (2015).
- 25-SILVA André Luiz da Costa, MEI Paulo Roberto: **Aços e Ligas Especiais**. Editora Blucher. 2010

- 26-SU J. , GUO W. , MENG W. , WANG J: **Plastic behavior and constitutive relations of DH-36 steel over a wide spectrum of strain rates and temperatures under tension.** Mechanics of Materials (2013).
- 27-TONG L.G., GU J.C.,YIN S.W.,WANG L. BAI S.W.; **Impacts of torch moving on phase change and fluid flow in weld pool of SMAW.** International Journal of Heat and Mass Transfer. (2016)
- 28-WAINER Emilio, BRANDI Sergio, MELLO Fabio Décourt Homem de: **Soldagem- Processos e Metalurgia.** São Paulo. Editora Blucher (1992).
- 29-WANG Xiutong, HOU Baorong: **Effect of the Nitrogen on Corrosion Behavior of Steel in 3,5% NaCl.** Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, China (2009).
- 30-WANG Yikun, WHARTON Julian A., SHENOI R. Ajit: **Ultimate strength analysis of aged steel-plated structures exposed to marine corrosion damage: A review.** Corrosion Science (2014).
- 31-YAN Ning, YU Shengfu, CHENG Ying: ***In Situ* observation of austenitic grain growth and transformation temperature in coarse grain heat affected zone of Ce-alloyed weld metal.** Journal of rare earths (2017).
- 32-ZHAO Haitao, PALMIERE Eric J.: **Effect of Austenite Grain Size on Acicular Ferrite Transformation in a HSLA steel.** Materials Characterization (2018).

ANEXO A

Certificado de usina- chapa ASTM A 131 DH36

[illegible]

ANEXO B

Certificado arame TIG

LINCOLN
ELECTRIC

Certificado de Qualidade

Produto: JG-51
 Dimensão: 3,2 x 1000 mm
 Código:
 Lote: Y178073251
 Classificação: ER70S-3
 Especificação: AWS A5.18/ ASME II Part C: SFA-5.18 Ed 2015
 AWS A5.18M:2005/ ASME II Part C: SFA-5.18M Ed. 2015:

Análise Química (%):

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Schedule: F
0,08	1,32	0,59	0,014	0,009	0,005	0,029	0,005	0,07	
V	0,003								

Ensaio Mecânicos

Ensaio de Tração: Schedule: F

Condição	Temp.(°C)	LR (MPa)	LE (MPa)	AI A4 (%)	AI A5 (%)	Z (%)
AW	-	550	460	29	-	-

Ensaio de impacto:

Condição	Temp.(°C)	C1	C2	C3	C4	C5	Méd
AW	-20	198	204	206	-	-	202 J

Informações adicionais:

H. Dif	Dureza	Ensaio de Filete	Radiografia	Dobramento	Nº Ferrita	Umidade
N/R	N/R	Aprovado	Aprovado	N/R	N/R	N/R

Outros:

O produto identificado acima foi fabricado, testado e fornecido de acordo com o Programa de Garantia da Qualidade ISO 9001.

Emitente: Guilherme Oliveira - Laboratório

Lincoln Electric do Brasil

Endereço: Av. Papa João Paulo I, 1818 – Cumbica, Guarulhos - SP

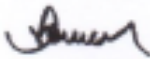
Tel.: 55 11 2431-4700 R320 Fax: 55 11 2431-5335

Email.: qualidade@lincolnelectric.com.br

Data
24/11/2017

ANEXO C

Certificado eletrodo revestido

		CERTIFICADO DA QUALIDADE Quality Certificate / Certificado de Calidad Conforme ASME/SAFAS.01/2010 Programa(Schedule) H	
Produto : OK 48.04 2,50 350,00 LT 15KG <i>Product/Producto</i>		Data de Produção : 21.02.2012 <i>Date/Fecha de Produccion</i>	
Lote : VT208E1604 <i>Lot Number/Produccion</i>			
Classificação : <i>Classification/Clasificación</i>			
AWS A5.1-04 ASME SA5.1/ 2010 E7018			
Corpos de Prova de Metal Depositado <i>AS Weld Metal Test Assemblies/Corpos de Prova del Metal Depositado</i>			
Análise Química (%) <i>Chemical Analysis/Análisis Químico</i>			
C	Si	Mn	P
0,130	0,510	1,450	0,027
Cr	Ni	Mo	V
0,032	0,022	0,004	0,005
Propriedades Mecânicas Típicas <i>Typical Mechanical Properties / Propiedades Mecánicas Típicas</i>			
Resistência a Tração (MPa)/Tensile Strength/Resistencia a la Tracción		580	
Limite de Escoamento (MPa)/Yield Strength/Limite de Fluencia		490	
Alongamento (%)Elongation/Alargamiento		30	
Teste de Impacto CHARPY-V (J)/Impact Test/Ensayo de Impacto		110	
Temperatura (°C)/Temperature/Temperatura		-30	
Teste de Filete <i>Weld Metal Test / Ensayo de Filete</i>			
ATENDE AOS REQUISITOS SATISFY OUR REQUIREMENTS ATIENDE A LOS REQUISITOS			
Qualidade Radiográfica <i>Radiographic Test/Calidad Radiografica</i>			
GRADO 1		GRADO 1	
Observações <i>Observations/Observaciones</i>			
UNIDADE NOISTURE UNIDAD=0.638			
 SONIA REGINA SILVA ESAB Indústria e Comércio Ltda. Controle de Qualidade Consumíveis			

ANEXO D

Relatório original de ensaio de Dureza Vickers



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 19035520MESP

Fl. 1/1



Empresa interessada : **MARCELO YAMAGUTI**
Avenida Bartolomeu de Gusmão, 65 - Apto.23 - Boqueirão - Santos / SP

Pedido de ensaio : 284315

Natureza do trabalho : **DETERMINAÇÃO DE MICRODUREZA**

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

RECEBIMENTO/DATA.....: 28/02/2019 - Entregue no Laboratório Tork SP

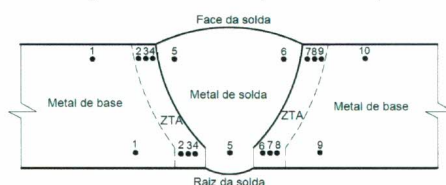
AMOSTRA RECEBIDA.....: 01 junta soldada de topo # 12,6 mm

MATERIAL.....: ASTM A 131 DH 36

PROCESSO.....: SMAW

REF. DO CLIENTE.....: E-mail de 26/02/2019

Croqui indicando a localização das endentações



RESULTADOS OBTIDOS

Microdureza verificada: VICKERS HV 0,5										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Face	145	152	169	174	195	213	195	201	201	152
Raiz	152	189	195	195	213	165	156	152	156	---

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

1. Procedimento Tork: P-517.
2. Determinações realizadas de acordo com a norma ASTM E 384, ed. 17
3. Local do Ensaio: Rua Cruzeiro, 419 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório: Metalográfico
4. Equipamentos utilizados:
Microdurômetro: Identificação Tork: 4231 - Escala: 500gf - Certificado RBC/Holtermann 21.099/18 (Microdurômetro) - D-K11142-01-00 (Penetrador) - válido 08/2019

Data dos Ensaios: 06 de Março de 2019.
Emissão do Relatório: São Paulo, 06 de Março de 2019.

Eng. Leopoldo Rosalín de Oliveira - CREA 0600318910
Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0056.

Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

RP-EM18 - Rev. 0

TORK Controle Tecnológico de Materiais Ltda.

KE

TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP: 01137-000 - Tel./fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 01137-020 - Tel./fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 19035521MESP

Fl. 1/1



Empresa interessada : **MARCELO YAMAGUTI**
Avenida Bartolomeu de Gusmão, 65 - Apto.23 - Boqueirão - Santos / SP

Pedido de ensaio : 284315

Natureza do trabalho : **DETERMINAÇÃO DE MICRODUREZA**

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

RECEBIMENTO/DATA.....: 28/02/2019 - Entregue no Laboratório Tork SP

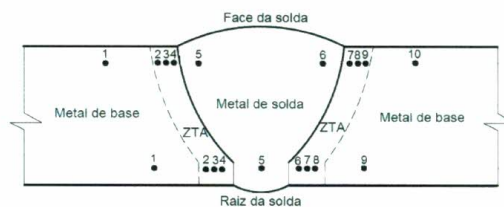
AMOSTRA RECEBIDA.....: 01 junta soldada de topo # 12,6 mm

MATERIAL.....: ASTM A 131 DH 36

PROCESSO.....: GTAW

REF. DO CLIENTE.....: E-mail de 26/02/2019

Croqui indicando a localização das endentações



RESULTADOS OBTIDOS

Microdureza verificada: VICKERS HV 0,5										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Face	149	179	174	189	187	220	169	179	169	156
Raiz	145	156	152	161	165	156	165	165	152	---

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

1. Procedimento Tork: P-517.
2. Determinações realizadas de acordo com a norma ASTM E 384, ed. 17
3. Local do Ensaio: Rua Cruzeiro, 419 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório: Metalográfico
4. Equipamentos utilizados:
Microdurômetro: Identificação Tork: 4231 - Escala: 500gf - Certificado RBC/Holtermann 21.099/18 (Microdurômetro) - D-K11142-01-00 (Penetrador) - válido 08/2019

Data dos Ensaio: 06 de Março de 2019.
Emissão do Relatório: São Paulo, 06 de Março de 2019.

Eng. Leopoldo Rosalim de Oliveira – CREA 0600318910
Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0056.

Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

RP-EM18 - Rev. 0

TORK Controle Tecnológico de Materiais Ltda.

KE

TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 – CEP: 01137-000 – Tel./fax: (11) 3392-3902 – e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 – CEP: 01137-020 – Tel./fax: (11) 3392-3902 – e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br