

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA- PPMEC

MATHEUS OLIVEIRA BALDEZ

**INFLUÊNCIA DA SOBREPOSIÇÃO DE ZONAS TERMICAMENTE AFETADAS NO
AÇO ASTM AH36 SOLDADO PELO PROCESSO FCAW**

Rio Grande - RS

2018

Matheus Oliveira Baldez

**INFLUÊNCIA DA SOBREPOSIÇÃO DE ZONAS TERMICAMENTE AFETADAS NO
AÇO ASTM AH36 SOLDADO PELO PROCESSO FCAW**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPMEC da Universidade Federal do Rio Grande - FURG como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Materiais e Soldagem.

Orientadora: Alice Gonçalves Osório

Rio Grande - RS

2018

Matheus Oliveira Baldez

Influência da sobreposição de zonas termicamente afetadas no aço
ASTM AH36 soldado pelo processo FCAW.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPMec da Universidade Federal do Rio Grande - FURG como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, aprovada pela comissão de avaliação abaixo assinada:

Dra. Alice Gonçalves Osório

Orientadora

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Dr. Douglas Bezerra de Araujo

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Dr. Jorge Luis Braz Medeiros

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Rio Grande, 28 de março de 2018.

Dedico este trabalho em especial a meus pais Geraldo e Sandra e irmãos Tiago e Thaís que estiveram a meu lado em toda vida. Também com muito amor, carinho e gratidão a minha companheira Marciele. Enfim a todos que não mediram esforços para me dar apoio e contribuíram para este momento chegar.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me guiar pelo melhor caminho, mesmo quando, este parece não ser possível de ser percorrido, me instigando a realiza-lo.

A minha família que me ensinou a ser uma pessoa com princípios, honesto e determinado a concluir meus objetivos de vida e que acima de tudo acredita em minha capacidade. Em especial aos meus pais Geraldo e Sandra, pelo exemplo e vida e por sempre buscar a melhor condição possível aos filhos, também a meus irmãos Tiago e Thaís, pelas conversas, conselhos, cumplicidade que só eles poderim oferecer, mesmo que distantes fisicamente, sempre muito próximos.

A minha segunda família, minha namorada Marciele Klein e seus pais, irmã e cunhado, por me acompanharem nesta jornada do mestrado, sempre aconselhando e encorajando, também dispondo de todo apoio quando necessário.

Aos amigos William Reyes e Bruno Brum pela amizade desde a chegada em Rio Grande e que com certeza será levada para vida.

Aos colegas de mestrado em especial ao amigo Marcos Saalfeld, pelas trocas de conhecimento e experiência da vida pratica na engenharia.

Aos técnicos dos laboratórios de Usinagem e Soldagem, Bruno Laner, Cristiano Celente, Daniel Sousa e Thais por todo o conhecimento técnico e disponibilidade que somente eles poderiam proporcionar.

A Capes pelo auxilio financeiro na concessão Bolsa.

A minha ilustre orientadora Dra. Alice Gonçalves Osório, por ter me acompanhado e instruído durante todo o período de mestrado apoiando minhas idéias e me incentivando em todos os momentos, contribuído imensamente para o meu desenvolvimento técnico e conclusão desta obra.

E finalmente a todos aqueles que sempre torceram, apoiaram e auxiliaram meus passos durante toda vida.

RESUMO

Motivado a encontrar soluções para aplicações de soldagem em aços de alta resistência e baixa liga utilizados para a construção naval, o presente trabalho proporciona uma reflexão quanto a aplicação de normas que estabelecem critérios, porém, não determinam as exatas condições de aplicação para ponderar sua determinação. Com o intuito de verificar e compreender as limitações de aplicação de uma instrução da IACS-47 (*International Association of Classification Societies Ltd*) referente ao espaçamento mínimo entre juntas de penetração total, foram realizados testes experimentais com espaçamento tendendo ao limite construtivo e avaliar os principais problemas em sua aplicação.

Para tornar possível o estudo, o processo de soldagem escolhido foi o FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), processo este que ao longo dos anos vem ganhando espaço em estaleiros brasileiros, quando comparado aos demais, por sua alta taxa de deposição, utilizando como proteção gasosa o Dióxido de Carbono (CO₂) e eletrodo consumível rutilico, adequado a soldagem em todas as posições.

Este trabalho propôs avaliar as alterações metalúrgicas e mecânicas geradas pela aplicação do processo de soldagem mencionado acima aplicados ao aço naval ASTM A131/131M Gr. AH-36, um aço microligado ao Niobio (Nb).

A avaliação foi realizada em chapas de 12,7 mm de espessura contendo duplo chanfro e X, ou seja, duas juntas a serem soldadas divididas em 2 grupos distintos. No primeiro grupo foi adicionado uma seção intermediária de apenas 13 mm de largura, e 3 mm de nariz. E a segunda condição utilizou-se uma inserção de uma chapa de 20 mm.

A caracterização mecânica se deu a partir de normas para ensaios de dobramento, tração e microdureza descritas pelas referências da AWS (*American Welding Society*) e Código ASME (*The american society of mechanical engineers*). Estas também utilizadas na caracterização da micro e macroestrutura analisada. Os resultados indicam que, mesmo para soldagens realizadas a 13 mm de distância não há impacto mecânico ou metalúrgico vinculado a algum efeito catastrófico. O efeito de soldagem devido a empenamentos se mostrou mais relevante.

Palavras chave: Aços microligados, Soldagem FCAW, ZTA

ABSTRACT

Being motivated to find solutions for welding applications in high strength low alloy steels for shipbuilding, the present study provides a insight into regularization application and criteria establishment. However, fixed conditions of this welding process will not be fully described. This is carried out In order to verify and understand the limitations of application of an IACS-47 (International Association of Classification Societies Ltd) instruction. Regarding to the minimum spacing between full penetration welds, experimental tests were carried out with spacing towards the constructive limit parameters and to evaluate the main problems in its application.

In order to make this study possible the welding process chosen was the FCAW (Flux Cored Arc Welding) process. Over the years this technology has been gaining space in Brazilian shipyards, when compared to the others, due to its high deposition rate, using carbon dioxide (CO₂) and rutile consumable electrode as gas protection, suitable for welding in all positions.

This work proposes to evaluate the metallurgical and mechanical changes generated by the application of the aforementioned welding process applied to ASTM A131 / 131M gr. AH-36, microalloyed to Niobium (Nb).

The evaluation was performed in 12.7 mm thick sheets containing double bevel and X, that is, two joints to be welded divided into 2 distinct groups. In the first group, an intermediate section of only 13 mm wide, and 3 mm of nose were added. And the second condition utilized an insert of a 20 mm sheet.

The mechanical characterization was based on standards for folding, tensile and microhardness tests described by reference mainly to the AWS (American Welding Society) and ASME Code (The american society of mechanic engineers). These are also used in the characterization of the analyzed micro and macrostructure. The results indicate that even for welding performed at 13 mm distance there is no mechanical or metallurgical impact linked to any catastrophic effect. The welding effect due to warping was more relevant.

Key Words: Microalloyed steels, Welding FCAW, HAZ (Heat Afected Zone)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Micrografia do metal de base ASTM A 131 GR AH 36, atacado com KLEMM I.	21
Figura 2: Microestrutura de um aço ASTM A 131.	22
Figura 3: Microestrutura da linha de fusão de um aço ASTM A 131 GR EH36.	23
Figura 4: Avaliação da ZF do aço AH-36 em soldagem FCAW.	24
Figura 5: Corpo de prova de seção retangular.	26
Figura 6: Perfil de microdureza comparativo entre três aços.	28
Figura 7: Corpo de prova de flexão lateral.	29
Figura 8: Fluxograma de atividades do projeto.	30
Figura 9: Corpos de prova para verificação.	33
Figura 10: Croqui dos corpos de prova.	35
Figura 11: Vista frontal do corpo de prova.	35
Figura 12: Detalhe do chanfro.	36
Figura 13: Dispositivo de deslocamento da tocha.	39
Figura 14: Chapa ponteadada.	40
Figura 15: Sequência de passes.	41
Figura 16: Croqui das amostras de tração.	43
Figura 17: Dispositivo de fixação.	44
Figura 18: Variação da abertura de raiz da segunda junta.	50
Figura 19: Zonas atacas quimicamente (A) e identificação (B).	52
Figura 20: Macrografia amostra de referência. Dimensões em (mm).	53
Figura 21: Macrografia amostra 2PM. Dimensões em (mm).	53
Figura 22: Macrografia amostra 4GM. Dimensões em (mm).	54
Figura 23: Detalhamento das dimensões da ZTAs da amostra 4GM.	55
Figura 24: Materia de base, em diferentes aumentos (A) 50X e (B) 1000x.	57
Figura 25: Material de base, imagem obtida por MEV.	58
Figura 26: Zona de refino de grão da amostra 2PM.	59
Figura 27: Zona de refino de grão da amostra 2PM, em maior ampliação.	59

Figura 28: Região de transição entre ZTA e ZF.	60
Figura 29: Imagem MEV zona de transformação ampliação de 5000x.	61
Figura 30: Zona de transformação.	62
Figura 31: Zona fundida amostra 6P, junta 2.....	63
Figura 32: Tensões - ensaios de tração amostras de referência.	64
Figura 33: Vista lateral das amostras de referência rompidas nos ensaios de tração.....	65
Figura 34: Ensaio de tração amostras grupo 1.....	66
Figura 35: Imagem das descontinuidades da solda.	67
Figura 36: Amostra 2P1 seção transversal (Esquerda) e face (direita).	67
Figura 37: Amostras condição 1. Face (esquerda) e transversal (direita).....	68
Figura 38: Ensaio de tração amostras grupo 2.....	68
Figura 39: AMOSTRA GRUPO 2. (A) VISTA SUPERIOR, (B) VISTA LAERAL.....	69
Figura 40: Amostras de dobramento. (A) Referências, (B) Grupo 1 e (C) Grupo 2...	71
Figura 41: Ensaio de dobramento amostra 2PD1.....	72
Figura 42: Localização das indentações realizadas na amostra de referência.	73
Figura 43: Perfil de dureza gerado da amostra de referência.....	74
Figura 44: Perfis de dureza 2P indicando as regiões. (a) Face superior (B) Face inferior.....	75
Figura 45: Perfis de dureza 6G indicando as regiões.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Largura da ZTA para soldagem GMAW.	22
Tabela 2: Dimensões para corpo de prova de tração.	26
Tabela 3: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO AH-36.....	32
Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço ah36.....	32
Tabela 5: Parâmetros de corte.	37
Tabela 6: Composição química do metal de adição E71T-1C.....	38
Tabela 7: Propriedades mecânicas do metal de adição E71T-1C.....	38
Tabela 8: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO AH36.....	47
Tabela 9: Características mecânicas do metal de base.	48
Tabela 10: Parametros definidos para soldagem (Junta 1).	49
Tabela 11: Parametros definidos para soldagem (Junta 2).	51
Tabela 12: Largura da ZTA.	55
Tabela 13: Resistência a tração amostras de referência.	64
Tabela 14: Resistência a tração amostras grupo 1.	66
Tabela 15: resistência a tração amostras grupo 2.	69
Tabela 16: Dados encontrados para dureza.	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	AÇOS ASTM A 131/131M	15
2.2	SOLDAGEM FCAW	17
2.2.1	Influência dos parâmetros na soldagem	18
2.2.2	Energia de soldagem e aporte térmico	19
2.3	MICROESTRUTURA DE AÇOS ASTM A131	20
2.4	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	24
2.4.1	Ensaio de tração	26
2.4.2	Microdureza Vickers	27
2.4.3	Ensaio de dobramento lateral	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	MATERIAIS	31
3.2	METODOLOGIA ADOTADA	31
3.2.1	Caracterização do material	31
3.2.2	Testes de soldagem preliminar	33
3.2.3	Preparação dos corpos de prova	34
3.3	METAL DE ADIÇÃO	37
3.3.4	Soldagem dos corpos de prova	38
3.3.5	Caracterização microestrutural	41
3.3.6	Ensaio mecânicos	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	AVALIAÇÃO DO METAL UTILIZADO	47
4.2	SOLDAGEM	48
4.3	MACROGRAFIA	51
4.4	MICROESTRUTURA	56
4.4.1	Metal de base	56
4.4.2	Zona de refino de grão	58
4.4.3	Zona de crescimento de grão ou zona de transformação	60
4.4.4	Zona fundida	62
4.5	ENSAIOS DE TRAÇÃO	63

4.5.1	Amostras de referência	63
4.5.2	Amostras grupo 1	65
4.5.3	Amostras grupo 2	68
4.6	ENSAIOS DE DOBRAMENTO LATERAL	69
4.7	MICRODUREZA	72
5	ANÁLISE E RESUMO FINAL DOS RESULTADOS	76
6	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

A indústria Naval e Offshore no Brasil nos últimos anos esteve novamente em alta devido as condições de escassez de matéria energética mundial e a descoberta de grandes reservas de petróleo na zona do pré-sal. De acordo com o SINAVAL (Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e Offshore) em 2014 este setor foi responsável por empregar mais de 80 mil trabalhadores nos mais de 30 estaleiros brasileiros. Necessitando assim de cada vez mais aprimorar as tecnologias aplicadas para manter o mercado em atividade.

As pesquisas acerca de materiais se enquadram de maneira essencial para o propósito mencionado acima, visto que a engenharia busca em sua essência a otimização dos processos produtivos, unindo materiais com alto desempenho mecânico, facilidade de trabalho e custo de processamento; para que estes atendam todos os requisitos de projeto.

Desta maneira pesquisadores têm trabalhado para desenvolver materiais com alta performance, como é o caso dos aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) ou, do inglês, HSLA (*High Strength Low Alloy*), e também conhecidos como aços microligados. Este é o caso do aço ASTM A131 Tipo AH36, um dos mais utilizados na indústria naval.

Na fabricação de componentes para a indústria naval, destacam-se os processos de conformação mecânica e soldagem. Com a tendência de aumentar a produtividade, atualmente um dos métodos que possui larga aplicação em soldagem é o FCAW (do inglês, *Flux Cored Arc Welding*), que possibilita altas taxas de deposição, disponibilidade de automação além de ser um processo adequado para soldagem fora de posição. Em alguns componentes, há a necessidade de se soldar materiais com espaçamento muito pequeno entre as soldas.

Fazendo uso de conceitos e técnicas acima mencionados, o intuito deste trabalho é avaliar as características resultantes da Zona Termicamente Afetada (ZTA) de um aço naval AH36 soldado pelo processo FCAW, quando a ZTA sofre a ação de dois cordões de solda distintos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar as características microestruturais e propriedades mecânicas impactadas pela ZTA ou Zona Afetada pelo Calor (ZAC) de um aço ASTM A131 tipo AH36, quando este possui soldagens paralelas de juntas chanfradas, soldadas pelo processo FCAW. Pretende-se, a partir desta avaliação, estabelecer a distância mínimas para execução deste tipo de conjunto, sem que haja prejuízo à integridade do material de base. Para que seja possível alcançar este objetivo, algumas metas devem ser alcançadas, como:

1. Estabelecer parâmetros confiáveis para a soldagem dos corpos de prova (CP);
2. Realizar CP's de referência com os parâmetros estipulados;
3. Avaliar a microestrutura gerada pelo processo;
4. Definir os espaçamentos entre os cordões a partir da microestrutura obtida;
5. Avaliar as características mecânicas e metalúrgicas geradas para cada grupo;
6. Comparar os resultados gerados pelos diferentes grupos;
7. Comparar os resultados dos corpos de prova com a referência;
8. Estabelecer as variáveis com maior influência nas propriedades mecânicas;
9. Realizar a identificação microestrutural dos elementos da ZTA e Zona fundida (ZF).

1.2 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção naval cada vez buscando o maior aproveitamento de seus recursos, utiliza para fabricação de cascos de navios e plataformas chapas laminadas que demandam soldas contínuas de longas distâncias; este fator contribui para que hajam empenamentos e distorções, que por muitas vezes necessitam de reparos.

De acordo com a IACS-47 (*International Association of Classification Societies Ltd*) a maior distância possível para ajuste é de 25 mm ou 1,5 vezes a espessura (limitado ao menor dos valores) para chapas suscetíveis a soldagem de topo com chanfro em V ou X. Quando a distância é superior a um dos limites estabelecidos, obrigatoriamente se deve cortar as chapas e inserir uma seção intermediária com o mínimo de 300 mm de largura.

O estudo aqui proposto visa contribuir ao entendimento dos impactos causados na microestrutura do material em análise, quando este é submetido a inserções com seção intermediária de largura menor que a recomendação na IACS, onde as ZTA's dos dois cordões de solda ficam próximas, podendo haver sobreposição dessas zonas. As soldagens em análise se utilizam do processo FCAW com adição de gás de proteção e consumível rutílico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS ASTM A 131/131M

De acordo com a Norma ASTM A131/131M (2014), norma esta específica para classificação de aços utilizados para a construção naval, os aços utilizados nesta indústria podem ser divididos em duas categorias: comuns (tensão de escoamento mínima de 235 Mpa) e de alta resistência (tensão de escoamento mínima de 315 Mpa). Sendo que as classes mais encontradas na forma de chapas são “A” para aços comuns e “AH32” ou “AH36” para os aços de alta resistência ou com elementos criadores de microliga. A norma ainda indica os tratamentos térmicos para cada classificação, também os seus requisitos químicos e mecânicos, assim como os aspectos metalúrgicos.

Segundo Gorni (2008), os aços microligados são estudados desde o final da década de 1950. A esses aços são adicionadas pequenas porções de elementos como V, Ti e Nb, o que possibilita o desenvolvimento de tratamentos termomecânicos que permitem a obtenção de microestruturas altamente refinadas, agindo diretamente em fatores como resistência mecânica e tenacidade. Estes tratamentos favorecem a formação de precipitados e permitem a redução do teor de C, contribuindo para soldabilidade do aço.

Para Zhao (2002), as propriedades dos aços ARBL se dão devido ao processo TMCP (*Termo-Mechanical Control Process*), também conhecido como processo de laminação controlado e resfriamento acelerado. Segundo a referência são as principais influências para alavancar o limite de escoamento e tenacidade.

Segundo Ribeiro (2015), o resultado de grãos mais finos se dá a partir do uso do TMCP, apresentando menor temperatura de transição dúctil-frágil para chapas onde esse tratamento é aplicado. Outra vantagem apresentada pelos aços microligados é maior resistência à corrosão que outros aços com o mesmo teor de carbono, disponibilizando economia de material e peso. Os aços EH36 e AH36 demonstram estas características constituídas por grãos ferríticos e perlíticos refinados.

Segundo Gorni (2008), os aços ferrítico-perlítico são produzidos a partir de ligas comuns e com fácil processamento, porém mantendo-se os fatores principais controlados, para reter o deslocamento de discordâncias.

De acordo com Cota (2002), que estudou a influência da temperatura de austenitização de um aço microligado ao Nb, demonstrou que a presença deste elemento de liga faz com que a faixa de tempo de transformação da austenita em ferrita alotriomórfica seja aumentada, reduzindo desta maneira a taxa efetiva de transformação, o que favorece a formação de bainita granular quando utilizadas temperaturas de austenitização de 1100°C e resfriamento ao ar.

Estudos com aço estrutural tipo AH36 são frequentes, visando o melhor entendimento de suas propriedades ou até mesmo diversificando processos de soldagem e avaliando novas técnicas, como o estudo realizado por Ribeiro (2015), onde foi soldado este aço pelo processo a arco submerso ou *Submerged Arc Welding* (SAW) utilizando a técnica de duplo arame Tandem para avaliar as alterações mecânicas e microestruturais promovidas, quando comparadas com a utilização do processo padrão de soldagem SAW.

Guimarães (2010), realizou estudos através de métodos numéricos para a determinação do gradiente de temperatura para possibilitar a avaliação das tensões na estrutura de um aço AH-36 quando este é submetido ao processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), com controle dos parâmetros de soldagem como: velocidade de avanço, tensão e corrente. O autor utilizou para verificação de tensões uma metodologia baseada em medidas de deslocamento de furos referenciados e difração de raios X.

Maciel (2014) utilizou aços com classificação ASTM A131 para comparar processos de soldagem distintos aplicando inclusive técnicas vibracionais para soldagem, visando minimizar os efeitos de trincas e excesso de deformações provenientes da soldagem. Este obteve resultados de redução de dureza na ZTA e ZF o que propicia aumento de tenacidade para as condições onde há aplicação da *Welding conditioning*.

Osório et. al (2016), verificou a interação ocorrida entre o material de base classificação EH-36, o fluxo de soldagem ESAB – OK FLUX 10.71 e o arame F7A4 EM12K, onde se percebeu que há uma tendência de migração dos elementos Mn e Ni para a poça fundida, assim como a perda de carbono para a atmosfera, também pode ser percebido o refinamento da microestrutura da ZTA e precipitados na ZF sendo atribuídos a migração dos elementos de liga para a poça de fusão.

2.2 SOLDAGEM FCAW

Os processos de soldagem a arco elétrico que utilizam gás de proteção surgiram inicialmente na década de 20, entretanto os mesmos só se tornaram comerciais apenas em 1948, com a caracterização GMAW (*Gás Metal Arc Welding*). Inicialmente este processo foi desenvolvido fazendo o uso de gás de proteção inerte pelo processo MIG (*Metal Inert Gás*) para soldagem de alumínio, com o desenvolvimento do método e a possibilidade de utilizar baixas densidades de corrente, foram introduzidas misturas de gases ativos e inertes gerando o termo MAG (*Metal Active Gás*), e assim consolidando o termo GMAW para este tipo de soldagem.

A partir da década de 50 começou a comercialização de eletrodos com fluxo interno (arames tubulares) o que permitiu um incremento na produtividade e melhores condições de operação e qualidade da soldagem com este processo, conhecido por *Flux Cored Arc Welding* (FCAW). A partir das décadas de 60 e 70 os Estados Unidos desenvolveram o processo, ocorrendo posteriormente a valorização do mesmo por outros países, como Japão e Brasil (FORTES, 2004).

O processo de soldagem FCAW é aquele definido pela união de metais através da adição de consumível alimentado continuamente em arco elétrico que promove a fusão do arame e a condução do mesmo sobre a peça a qual se deseja realizar a soldagem. A proteção do arco elétrico e da poça de fusão é realizada neste processo pelo fluxo interno de um arame tubular, podendo ser ainda complementada com gás de proteção. O fluxo interno formador da escória além de conferir a adição de elementos de liga, auxiliar a proteção do cordão de solda na solidificação e estabilização do arco elétrico, pode agir como desoxidante (CASTRO, 2015).

Os processos de soldagem FCAW e GMAW tem evoluído ao longo dos anos possibilitando a automação, diminuição de custo e alta flexibilidade a ajustes devido a introdução de tecnologias de arcos pulsados e a realização de gases de proteção com diferentes misturas, para aumento da taxa de deposição (MOREIRA, 2008).

Outra variação do referido processo é a aplicação de vibração na soldagem como apresentado por Maciel (2014), que utilizou a aplicação de vibração *Weld Conditioning* com a finalidade de obter-se redução do tamanho de grão e aumento da ductilidade da junta soldada. Já Castro (2015) em seu trabalho buscou avaliar soldagens produzidas por arames tubulares confeccionados em laboratório contendo

diferentes percentuais de polímero para compor o fluxo, buscando avaliar propriedades mecânicas pelo ensaio de microdureza.

Conforme retratado no trabalho de Starling et. al (2009), são fabricados no Brasil três tipos de arames tubulares destinados á soldagem de aços baixo carbono, os rutilicos, básicos e metálicos (*Metal Cored Wire*). No trabalho referido, estes arames foram submetidos a técnica de análise por EDS (Espectrômetro de energia dispersiva), que permite uma análise semi-quantitativa dos elementos que constituem cada consumível. Nota-se que o arame tubular rutilico possui principalmente Ti, Mn, Si, Fe e Al em sua composição e que este deve possuir grande quantidade de TiO_2 (dióxido de titânio) que contribui para o controle do ponto de fusão e viscosidade da escoria formada. Já os arames básicos possuem em sua composição grande quantidade de carbonetos e o arame metálicos são constituídos principalmente de Fe, Mn e Si, apresentando um fluxo predominantemente metálicos.

Segundo Starling et. al (2011), o tipo de transferência metálica que ocorre em arames tubulares do tipo rutilico, quando o processo ocorre com mistura para o gás de proteção de 75%Ar-25CO₂ para correntes crescentes a partir de 161 A até 275 A, se dá pela forma globular com a redução do tamanho da gota e aumento da frequência da transferência a medida que crescem os valores de corrente. Em baixas correntes podem apresentar alguma incidência de curto-circuito, apresentando formação de uma coluna de fluxo projetada à poça de fusão. Quando utilizado gás 100% CO₂ este não apresenta diferenças significativas quando operado a corrente de 160 A, havendo variação perceptível em correntes de 200 A quando, para o gás puro possui a mesma forma de transferência globular, porém, com gotas maiores e menor frequência de transferência que quando utilizada a mistura de gases.

2.2.1 Influência dos parâmetros na soldagem

Segundo Barbedo et al (2011), para a soldagem FCAW realizada com o consumível E71T-1, não é aconselhada a soldagem com a utilização de mata juntas, visto que este foi responsável pela falta de penetração total na junta ensaiada em seu trabalho, devido a retenção de escoria na raiz e diminuindo os valores de resistência à tração.

Segundo Moreira (2008), no processo de soldagem FCAW os fatores que possuem maior influência na taxa de deposição são a tensão e a corrente impostas no processo, e não estão relacionadas diretamente com o tipo de gás utilizado. Contudo percebe-se que cordões realizados, onde CO₂ foi utilizado como gás de proteção, possuem maior molhabilidade, apresentando perfis mais baixos, mais largos e com maior penetração no material de base.

Já para Gomes (2006), o gás de proteção compõe um dos principais fatores quando a transferência ocorre por curto circuito, juntamente aos valores de tensão, velocidade de alimentação e indutância. Para o CO₂ é importante trabalhar com baixa indutância devido ao arco permanecer mais estável e o cordão apresentar boas características, embora haja um incremento na taxa de respingos, fator que pode encarecer o processo quando em aplicações práticas.

Para a soldagem de aços baixo carbono deve-se estabelecer fatores ótimos de tensão, corrente e velocidade de soldagem para execução da soldagem, tendo em vista que estas influenciam na tensão de ruptura do material. Os efeitos causados pelo aumento de tensão e corrente demonstram uma diminuição na tensão de ruptura para um aço com 0,17% C e 1,21% Mn, valores que podem caracterizar o aço estudado neste trabalho (Ghaziviloo, 2010).

Segundo De Melo et al (2016) em seu estudo sobre previsão da ZTA quando alguns parâmetros são variados, demonstra a influência da variação da velocidade de soldagem, ângulo de bisel e tensão de soldagem, quando utiliza-se o processo *GMAW* associado ao gás de proteção composto de 75% Ar e 25% CO₂. Neste estudo o autor observa que há redução nas tensões residuais quando o ângulo do bisel é aumentado, bem como com a redução da velocidade de deslocamento e aumento da tensão elétrica, por estes fatores influenciarem no aumento do aporte térmico. Tais fatores implicam diretamente no tamanho da ZTA, apresentando dimensões maiores para baixas tensões residuais.

2.2.2 Energia de soldagem e aporte térmico

De acordo com Marques (2014), energia de soldagem é definida como a energia imposta pela fonte por unidade de comprimento de solda, sendo este valor utilizado para comparar os efeitos metalúrgicos causados por diferenças dos

parâmetros e processos de soldagem, o parâmetro de energia líquida também é conhecido como (*heat input*) definidos pelas equações 1 e 2.

Equação 1: Energia soldagem.

$$H = \frac{VI}{v}$$

Equação 2: Energia líquida de soldagem (*heat input*).

$$H = \frac{H_L}{\eta} \quad \text{ou} \quad H_L = H\eta$$

Onde:

H = Energia soldagem [J/cm];

H_L = Energial líquida de soldagem [J/cm];

V = Tensão de soldagem [V];

I = Corrente de soldagem [A];

v = Velocidade de soldagem [cm/s] e

η = Fator adimensional de rendimento.

Segundo Fortes (2004) os arames tubulares possuem maior área de projeção das gotas fundidas devido a menor área de contato, quando comparadas a arames sólidos, resultando na distribuição mais homogênea da energia de soldagem, o que gera cordões com aspecto mais raso, porém com melhor distribuição lateral quando comparado ao processo GMAW. Esta característica reduz, assim, a falta de penetração causada por possíveis desalinhamentos da junta soldada.

2.3 MICROESTRUTURA DE AÇOS ASTM A131

Segundo Ribeiro (2015) a partir da microestrutura do aço Gr AH 36 analisado em seu trabalho, é possível observar uma estrutura bandeada característica do processo TMCP, que quando atacados com o reagente klemm I apresentam perlita (cinza

escuro) e ferrita (azul), e também cementita (branco) na sua microestrutura, conforme Figura 1. Segundo o autor, o tamanho dos grãos ferríticos de seu material estão entre 8 e 9 μm para os menores grãos e 14 e 17 μm para os maiores, o que resultou em uma média de 12,5 μm .

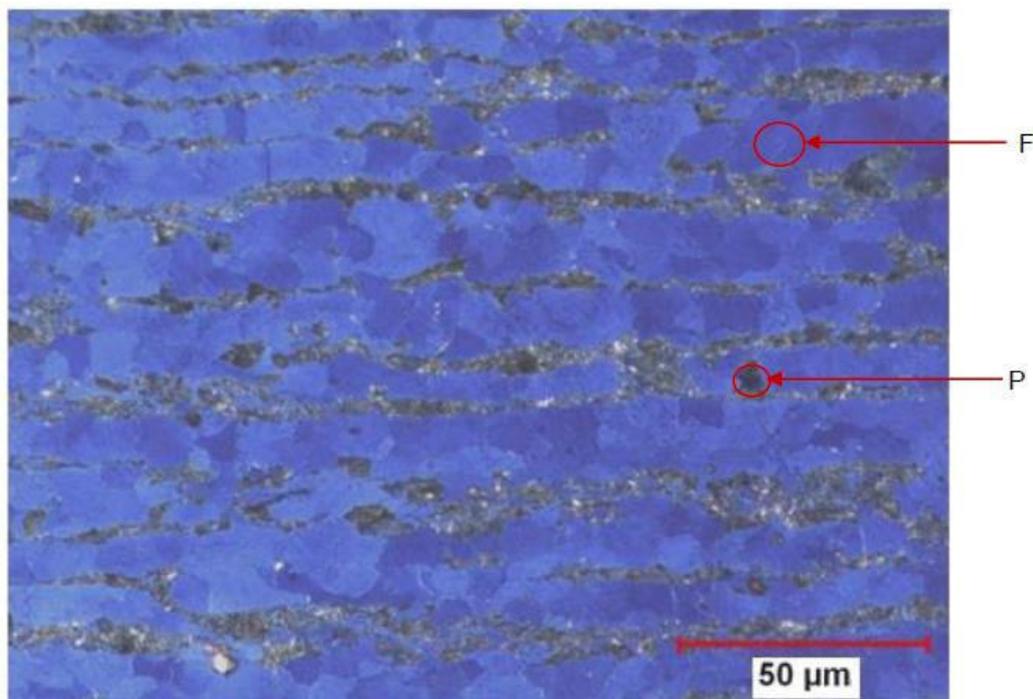


Figura 1: Micrografia do metal de base ASTM A 131 GR AH 36, atacado com KLEMM I.
Fonte: RIBEIRO, 2015.

Segundo Maciel (2014), a microestrutura de um aço ASTM A131 utilizada em seu trabalho não sofreu alteração no metal de base mesmo quando submetida a pré-aquecimento de 100° e pós aquecimento de 230° por uma hora, mantendo sempre o perfil indicado na Figura 2, que apresenta a microestrutura composta em sua maioria de ferrita na fase mais clara e perlita equiaxial na fase escura.

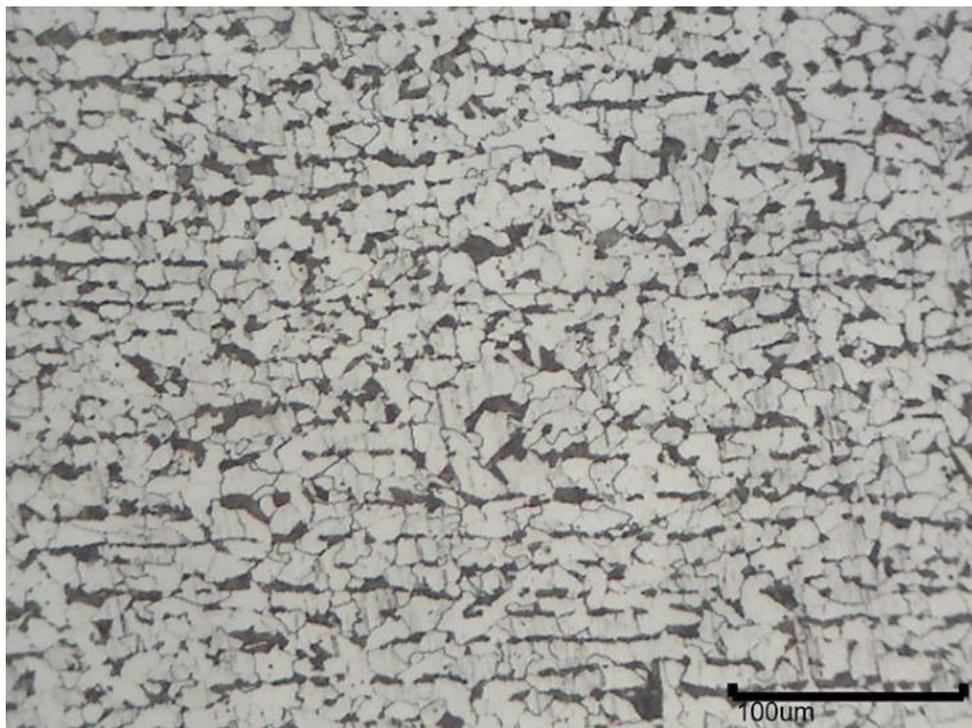


Figura 2: Microestrutura de um aço ASTM A 131.
Fonte: Maciel, 2014.

Para a avaliação da extensão da ZTA de um aço AH-36, soldado pelo processo GMAW, De Melo et al (2016) utilizou o instrumento de medição de um microscópio óptico, avaliando-se apenas a extensão do último passe. O comprimento da ZAC está representado na Tabela 1.

Tabela 1: Largura da ZTA para soldagem GMAW.

Amostra	Largura da ZTA (mm)
1	1,80
2	1,60
3	2,10
4	2,00

Fonte: Melo et al, 2016.

Ribeiro (2015) avaliou a variação no comprimento da ZAC causada pela utilização do processo SAW comum e Tandem (duplo arame). Ambas foram aplicadas sobre soldagem de raiz pelo processo FCAW, havendo assim alteração de energia de soldagem entre os processos e, por conseguinte, variação no tamanho ZTA. Observou-se maior extensão da ZTA onde há incidência de maior número de passes devido ao reaquecimento causado pela sobreposição de passes. O autor obteve cerca

de 43% de redução no comprimento da ZAC do processo SAW Tandem quando comparado à soldagem SAW comum.

O trabalho realizado por Osório et al. (2016), demonstra a variação microestrutural causada pela soldagem SAW de um aço microligado, onde a ZTA é configurada a partir de grãos refinados e na zona parcialmente fundida (ZPF) a formação de bainita, microestrutura esta com maior dureza do que as regiões adjacentes, também sendo possível notar a ZF contendo grãos finos e colunares conforme Figura 3. De acordo com o estudo de Aloraier (2006), demonstra que quando ha sobreposição de passes a bainitica acicular pode ser transformada em bainita esferoidizada reduzindo a dureza da região.



Figura 3: Microestrutura da linha de fusão de um aço ASTM A 131 GR EH36.
Fonte: OSÓRIO ET AL, 2016.

O trabalho de Da Silva (2018), buscou avaliar as características microestruturais da ZTA e ZF de aços AH-36 soldado pelos processos MIG e Arame tubular, onde nota-se na Figura 4 a caracterização microestrutural da ZF, sendo

possível observar que a ferrita encontra-se na forma poligonal (PF). Sendo esta uma microestrutura à base de ferrita (α) e perlita (P), encontrando-se também ferrita Widmanstätten (WF) ou ferrita bainítica (BF), demonstrando as características de um aço convencionalmente laminado a quente. Já para Junior (2013), a microestrutura encontrada na zona fundida de uma soldagem realizada por arame tubular foram ferrita de segunda fase, ferrita acicular e ferrita de contorno de grão. Sendo estas também identificadas no trabalho de Rodrigues (2011).

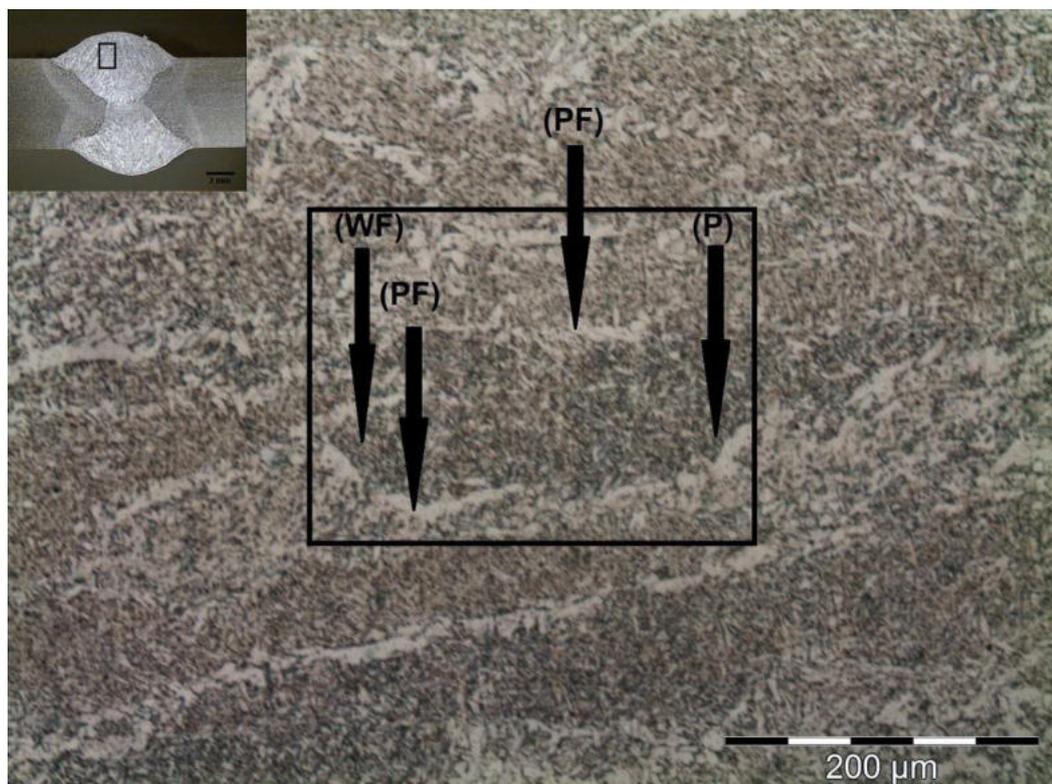


Figura 4: Avaliação da ZF do aço AH-36 em soldagem FCAW.
Fonte: Da Silva, 2018

2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Um dos aspectos fortemente estudados atualmente é a relevância do carbono equivalente para mensurar as propriedades de um determinado material. Este fator determina uma estimativa dos efeitos de elementos de liga, microestrutura da ZAC de aços estruturais, tendência a fissuração pela presença de hidrogênio (trincas de hidrogênio) e auxilia a determinar os níveis demandados de pré-aquecimento do material. As equações para cálculo do carbono equivalente podem ser expressas em

massa do elemento químico encontrado, aplicado como parâmetros de contribuição independente, como na Equação 3, adotada pelo IIW (*Internationa Istitute of Welding*), que é a mais conhecida (Marques et al, 2014).

Equação 3: Cálculo do carbono equivalente.

$$Ceq_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Segundo Modenesi (2004), na soldabilidade o fator do carbono equivalente está relacionado ao material apresentar sensibilidade à fissuração por hidrogênio, assim é adequado a utilização de aços de alta ductilidade e baixo limite de escoamento visto que estes apresentam menor possibilidade de têmpera, mantendo o baixo carbono. As equações buscam equiparar os elementos de liga em termos comparativos à influência do próprio carbono, de modo a acrescentar cada parcela e esta contribuir para a sensibilidade à fissuração.

A utilização do aço estrutural AH-36 por possuir as características e propriedades dos aços HSLA, que segundo Gorni (2008), contem elementos de micro-liga, podem proporcionar aumento da resistência mecânica através do endurecimento por precipitação interfásica que ocorre ao longo do resfriamento após a laminação, porém este endurecimento acarreta na redução da tenacidade do material. Estes aços tem a capacidade supramencionada juntamente com a alta soldabilidade de um aço baixo carbono, o que torna os custos operacionais mais baixos.

O estudo realizado por Melo et. al (2016) avalia as propriedades da ZTA do aço ASTM A131 Grau AH36 soldado pelo processo GMAW, avaliando três condições distintas de soldagem. Estas condições são comparadas por meio de software, com representação dos gradientes de temperatura, e por macrografias das amostras. Constata-se que há redução dos níveis de tensões residuais quando o ângulo do bisel é variado de 25° para 35°, também havendo redução nas tensões residuais devido a redução da velocidade de soldagem, aumento da tensão elétrica e aumento do número de passes e aporte térmico. Estes fatores contribuem para o aumento da ZTA quando há redução nas tensões residuais. Estes resultados demonstram que há condições onde a abetura do bisel pode ser uma variável a considerar, quando comparadas extensões das variações microestruturais.

2.4.1 Ensaio de tração

Segundo NBR ISO 6892-1 (2013), o ensaio de tração consiste na deformação de um corpo de prova submetido à tração, geralmente até a fratura do mesmo com a finalidade de obter alguns valores associados às propriedades mecânicas do material em análise.

De acordo com AWS D1.1-D1.1M há uma serie de critérios de aceitação que devem ser ponderados para aceitação do material no caso do ensaio de tração de seção reduzida, como observar a carga máxima e dividi-la pela área resistente, e o valor apurado deve ser superior ao limite mínimo especificado para o material. As dimensões do corpo de prova de seção retangular deve atender aos parâmetros mínimos estabelecidos nesta norma, de acordo com a Figura 5, e Tabela 2.

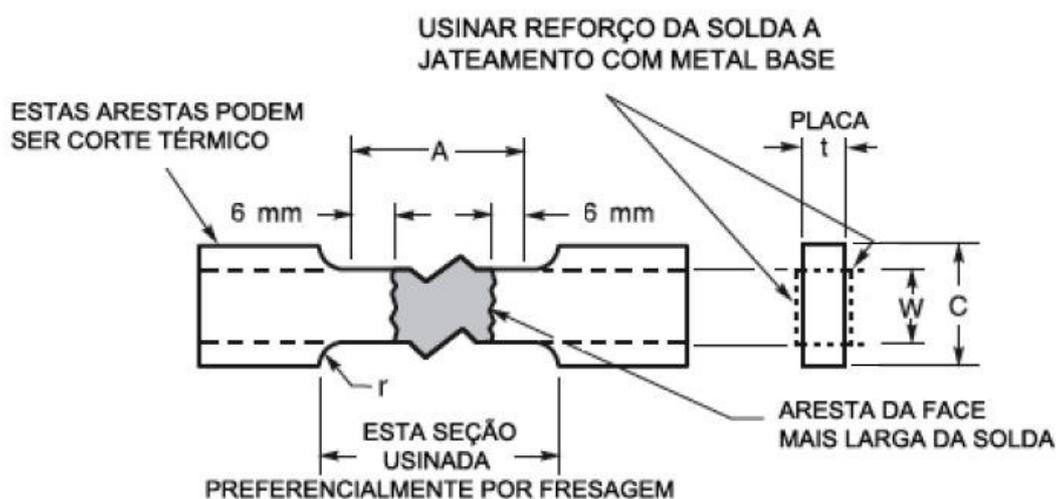


Figura 5: Corpo de prova de seção retangular.
Fonte: Adaptado de AWS D1.1-D1.1M.

Tabela 2: Dimensões para corpo de prova de tração.

Tp - Espessura Nominal de Placa de Teste Menor ou Igual a 25mm	
A – Comprimento de seção reduzida	Face mais larga da solda + 12 mm (min)
L – Comprimento geral, min	Como requerido por equipamento de teste
W – Largura de seção reduzida	20 mm (min)
C – Largura da seção de aderência	W + 12mm (min)
t – Espessura do espécime	Tp
r – Raio de filete, min.	12 mm

Fonte: Adaptado de AWS D1.1-D1.1M.

Neste ensaio, o corpo de prova é submetido a uma força paralela a seu comprimento, gerando deformações que são captadas e informadas através de curvas de tensão-deformação. A partir destas curvas é possível avaliar o comportamento elástico-plástico, LR (limite de resistência), LE (limite de elasticidade), alongamento, redução da seção transversal, dentre outros (RIBEIRO, 2015).

2.4.2 Microdureza Vickers

De acordo com a norma ASTM E384 (2017), o ensaio de microdureza Vickers é aquele em que o material objeto da análise é submetido a uma força inferior a 9,870 N aplicada através de um indentador piramidal de base quadrada, onde os planos das faces formam entre si um ângulo de 136°. O método se baseia na relação entre a força aplicada (HV) e a dimensão das duas diagonais geradas na indentação da peça. Sendo este um teste realizado em laboratório, deve ser realizado com controle de temperatura, vibrações e limpeza do local, fatores que podem interferir nos valores lidos, ocasionando erros de medição.

Segundo Perine (2014), que realizou a comparação da microdureza Vickers causada pelas soldagens realizadas em dois aços ARBL distintos (DOGAL 800 e ZSTE 380), comparados com a um aço comum (ZAR 230), este concluiu que a variação da microdureza está atrelada ao comprimento da ZTA e esta tende a apresentar maiores extensões para os ARBL. O seu estudo ainda demonstra que o aço comum na região da solda tem apenas um pequeno acréscimo de dureza na região do metal de adição. Para o metal com classificação ZSTE 380, o perfil de dureza aparece de forma crescente do metal de base para a zona fundida, mesmo esta se mantendo a valores similares ao aço ZAR 230, sendo o acréscimo de dureza presente na ZTA. No caso do aço DOGAL 800, este demonstra um perfil de dureza onde os maiores valores estão na ZTA como indicado no gráfico da Figura 6.

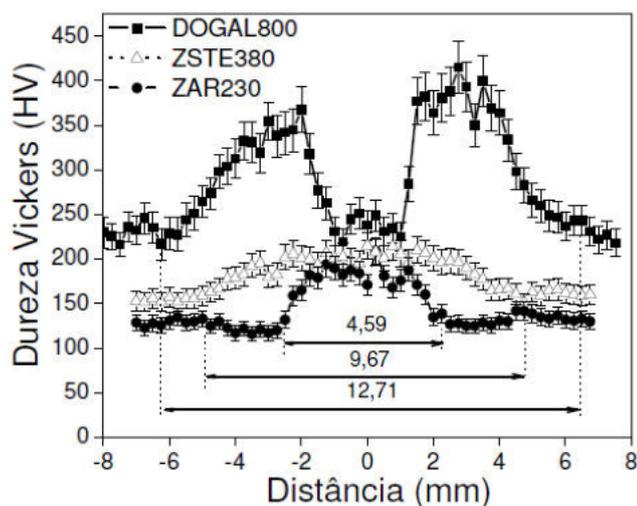


Figura 6: Perfil de microdureza comparativo entre três aços.
Fonte: Perine, 2014.

Já Maciel (2014) utilizou o ensaio de microdureza para comparar diferentes condições de soldagem e tratamentos vibracionais para o mesmo material, demonstrando que os corpos de prova que utilizam a técnica vibracional proposta em seu trabalho apresentam menor dureza na ZTA e ZF, quando comparado aos demais processos, indicando aumento da tenacidade da união soldada.

2.4.3 Ensaio de dobramento lateral

De acordo com a norma AWS D1.1-D1.1M o ensaio de dobramento é um ensaio de natureza qualitativa, considera-se para avaliação do corpo de prova após o teste uma inspeção visual, sendo os fatores determinantes para aceitação do teste que superfície não apresente nenhuma descontinuidade maior que 3mm em qualquer direção, entre outros. Assim como indicado na própria norma, é aconselhável o ensaio de duas amostras de flexão lateral para verificação do consumível, conforme Figura 7.

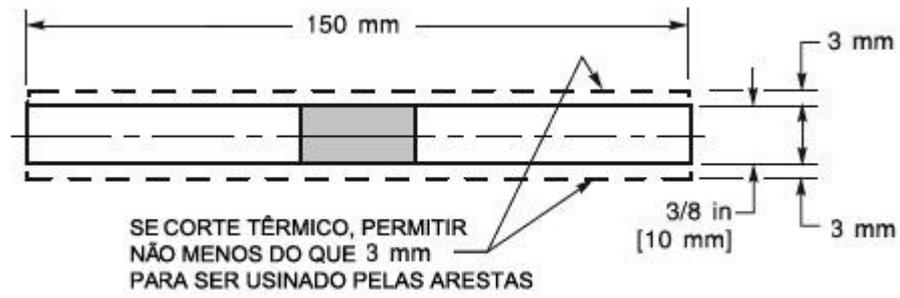


Figura 7: Corpo de prova de flexão lateral.
Fonte: Adaptado de AWS D1.1-D1.1M.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais adotados para realizar a metodologia foram embasados em referências normativas para soldagem do aço AH-36.

Este capítulo retrata os procedimentos adotados para elaboração deste trabalho, desde a definição do material até os últimos ensaios experimentais necessários. Em acordo com as descrições do fluxograma presente na Figura 8.

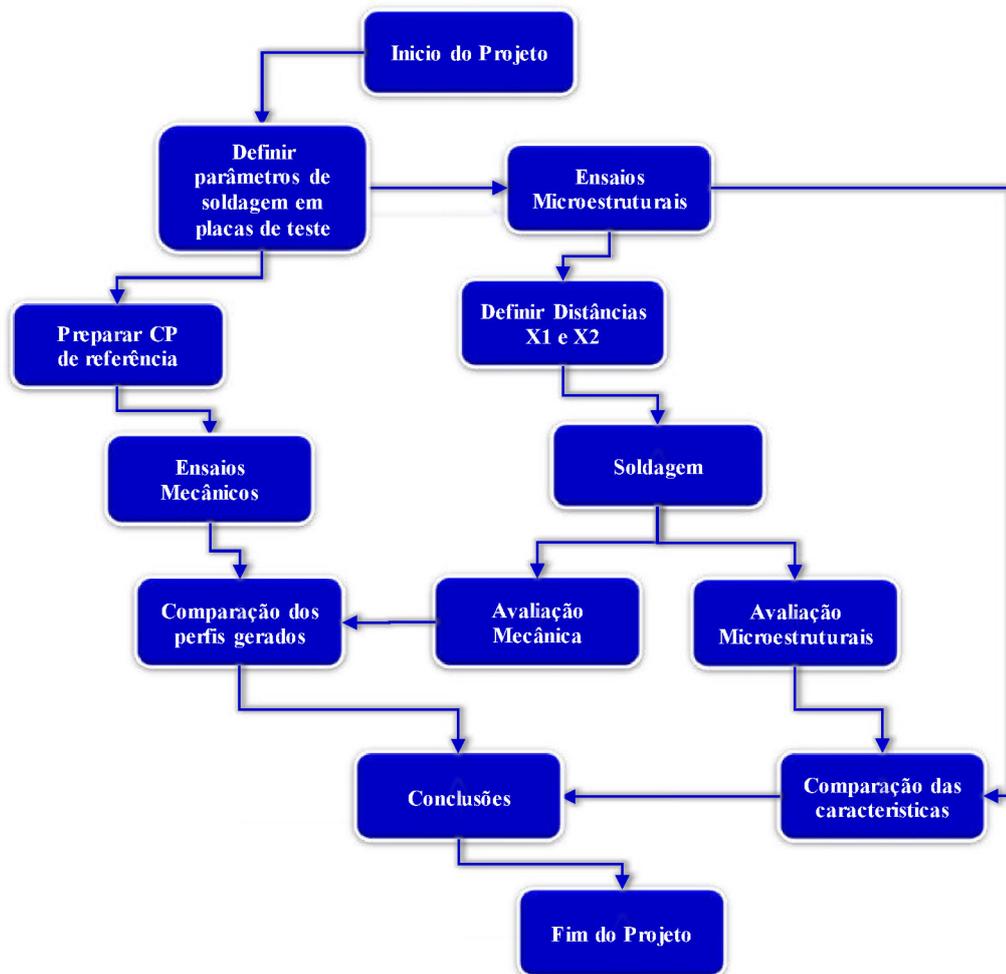


Figura 8: Fluxograma de atividades do projeto.
Fonte: Autor.

3.1 MATERIAIS

Para execução do trabalho proposto a principal matéria prima foi o aço ASTM A131 Gr AH-36 utilizado largamente na construção naval, comumente encontrado na forma de chapas. Para este estudo em específico demandou-se de chapas de espessura de 12,7mm ($\frac{1}{2}$ in). Por ser um aço microligado, este apresenta elevada resistência e, assim, demanda menor quantidade de material (redução de peso) sem perder as características mecânicas necessárias. Este aço é utilizado em toda a estrutura de compartimentação e exterior dos cascos de plataformas contruídas no país.

Logicamente, para realizar um estudo onde aplica-se processos de soldagem e verificação de propriedades mecânicas e microestruturais, existe grande quantidade de ferramentas e insumos necessários para a correta investigação e avaliação.

Excluindo os equipamentos demandados para preparação de amostras e realização dos experimentos, esta seção demonstra os bens consumíveis envolvidos na metodologia, como o arame tubular da marca Hyunday Welding classificação SF-71 equivalente ao AWS E71T-1, amplamente conhecido e aplicado para soldagem em todas as posições. Para preparação e limpeza da junta a ser soldada foram utilizados discos abrasivos de corte, desbaste e flap, e escovas manuais de aço carbono.

Para a preparação metalográfica das amostras se mostraram importantes os consumíveis metalográficos (lixas d'água, pano de polimento e suspensão de alumina) e reagentes químicos (ácido nítrico para preparo do Nital 5% para ataque microestrutural).

3.2 METODOLOGIA ADOTADA

3.2.1 Caracterização do material

O material escolhido para o estudo foi o aço estrutural normalizados ASTM A131 Gr. AH36, destinado principalmente para construção naval. Um aço com baixo carbono microligado classificado como Alta Resistencia e Baixa Liga (ARBL). A Tabela 3 indica a composição química exigida pela norma ASTM A131/A131M para que o aço tenha a classificação AH 36.

Tabela 3: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO AH-36.

ASTM A131/A131M – 94		
Elemento Químico	Símbolo	Composição
Carbon, max	C	0,18
Manganese	Mn	0,9-1,6
Phosphorus, max	P	0,035
Sulfur, max	S	0,04
Silicon	Si	0,1-0,5
Niquel, max	Ni	0,4
Chromium, max	Cr	0,25
Molybdenum, max	Mo	0,08
Copper, max	Cu	0,35
Niobium, max	Ni	0,05
Vanadium, max	V	0,1

Fonte: Adaptado de ASTM A131/ A131M - Standard Specification for Structural Steel, 2014.

Um dos critérios químicos estabelecidos pela norma se refere ao valor calculado do carbono equivalente que não pode exceder 0,38%. Este valor pode ser aproximado de acordo com a Equação 3 indicada na página 25.

Outro fator determinante para a caracterização do material são suas propriedades mecânicas, que por sua vez podem ser mensuradas via ensaio de tração e impacto charpy. De acordo com a norma referenciada, as características mecânicas mínimas para esta classe de aço estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço ah36

ASTM A131/A131M - 94 AH36			
L. E. (MPa)	L.R. (MPa)	Alongamento (%)	Valor mínimo da tenacidade a 0°C (J)
355	490-620	19-22	34

Fonte: ASTM A131/ A131M – 14 Standard Specification for Structural Steel, 2014.

Com a finalidade de verificar as características químicas mencionadas, foi realizado o ensaio de espectrometria de emissão óptica em uma amostra, realizando-se três medições em pontos diferentes da amostra. Quando as características químicas se mostraram adequadas, e o cálculo do Carbono Equivalente se manteve abaixo dos limites estabelecidos, foram retiradas três amostras para ensaio de tração

simples na chapa, de acordo com a norma NBR ISO-6892-1, classificados em não proporcionais. Estes foram usinados conforme apresentado na Figura 9.



Figura 9: Corpos de prova para verificação das propriedades mecânicas

Fonte: Autor

Com base nos resultados obtidos para o material previamente à soldagem, verificou-se que o mesmo atende aos requisitos exigidos por norma, o que possibilita o desenvolvimento do estudo. Estes resultados estão apresentados no Capítulo 5 deste trabalho.

3.2.2 Testes de soldagem preliminar

Com o objetivo de definir os parâmetros de estudo, foram realizados testes preliminares de soldagem necessários para estabelecer as distâncias entre os cordões de solda e os parâmetros confiáveis para realização da soldagem como:

velocidade de avanço, vazão do gás de proteção, DBCP, tensão, velocidade de alimentação do arame tubular e inclinação da tocha de soldagem.

Buscando os objetivos mencionados acima, foram confeccionados corpos de prova de aço ASTM A36 de 12,7mm de espessura, contendo um único chanfro em X, sendo necessários 12 conjuntos para regulagem adequada dos parâmetros.

Após a etapa descrita acima, realizou-se cortes transversais ao longo dos cordões para verificar condições de penetração e perfil de reforço, bem como verificar a extensão da ZTA. Quando estas se apresentaram satisfatórias, os parâmetros foram fixados para aplicação no objeto de estudo deste trabalho.

As propagações das ZTAs foram mensuradas para determinar as distâncias de soldagem, visando levar a aplicação ao seu limite. A determinação da distância entre soldas considerou situação extrema, onde se procurou aproximar ao máximo as regiões potencialmente prejudiciais à integridade do material, levando em consideração a viabilidade da fabricação dos corpos de prova.

3.2.3 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram realizados utilizando o modelo representado nas Figura 10 e 11, divididos em dois grupos de diferentes distâncias $X_1 = 13$ mm (grupo 1) e $X_2 = 20$ mm (grupo 2), mantendo sempre o mesmo sentido de corte da chapa. Estas dimensões foram estabelecidas embasadas nos resultados obtidos dos CP's de parametrização e também pela limitação construtiva das chapas do grupo 1, com apenas 13mm, valor este que se aproxima da espessura da chapa de 12,7 mm, ou seja, não respeita o limite inferior previsto pela IACS. Já a distância de 20 mm está logo acima do limite máximo de $1,5 \times$ a espessura, sendo esta uma configuração que deveria ser utilizada na chapa inserida de 300 mm.

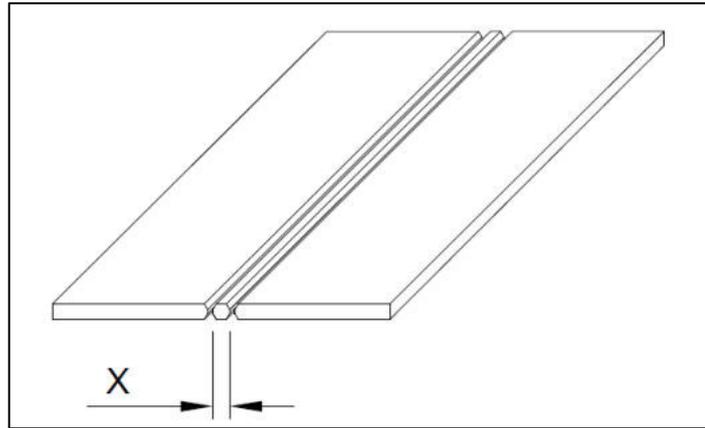


Figura 10: Croqui dos corpos de prova.
Fonte: Autor.

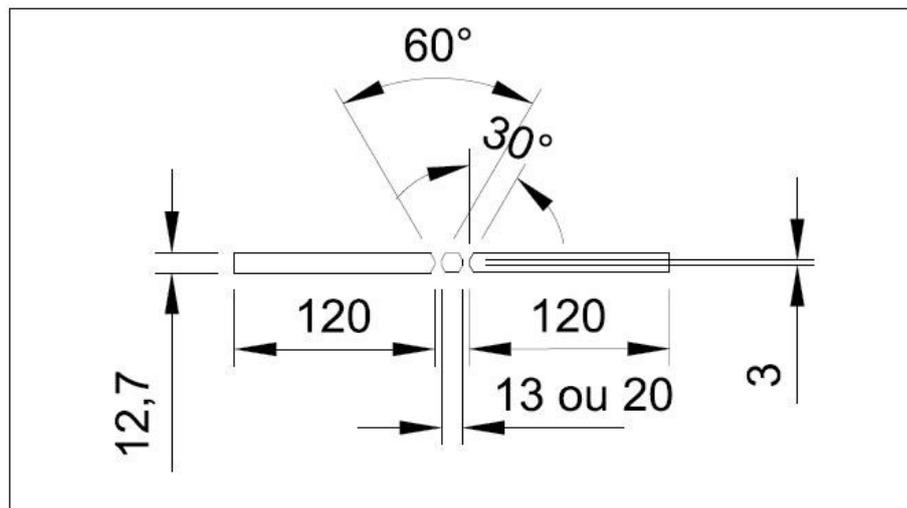


Figura 11: Vista frontal do corpo de prova.
Fonte: Autor

O chanfro em X (Figura 12) foi definido de acordo com a norma AWS e também para proporcionar as mesmas condições na superfície superior e inferior, podendo-se assim realizar comparações de microestruturas e microdureza nas duas superfícies, visto que estas apresentam a mesma distância relativa ao centro.

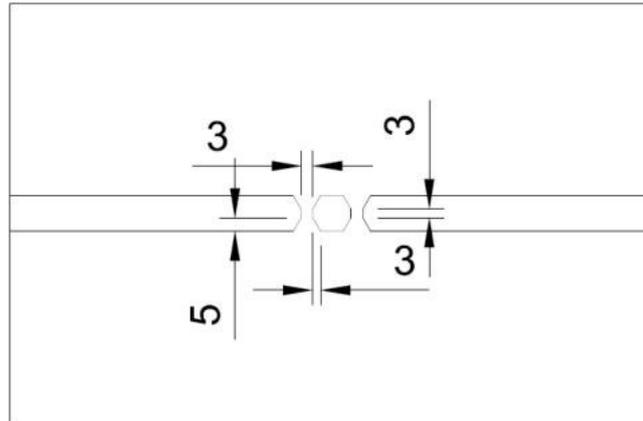


Figura 12: Detalhe do chanfro.
Fonte: Autor

Para confecção dos CP's foram definidas todas as necessidades do projeto, como a quantidade de CP's necessária e suas características dimensionais adequadas aos testes que as amostras seriam submetidas. Resultando na fabricação de 9 CP's, sendo eles divididos em três grupos:

- 1 CP de referência
- 4 CPs de teste com distância X1;
- 4 CPs de teste com distância X2.

O corpo de prova de referência é o único contendo apenas uma junta soldada, como geralmente ocorre em testes de qualificação de procedimentos, processos e soldadores na indústria. Este serve como objeto de comparação direta para determinar as condições de desempenho do tipo de união aqui proposto.

O primeiro passo da preparação dos CPs consiste em cortar a chapa de aço em seções, esta atividade foi realizada utilizando o equipamento de corte plasma da marca *Hypertherm* modelo *powermax 1650* terceira geração, em conjunto com uma tartaruga de deslocamento linear, com possibilidade de ajuste de altura do bico de corte.

Seguindo as especificações e recomendações do fabricante para a condição correta de operação do equipamento, foram estabelecidos os parâmetros de corte apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Parâmetros de corte.

Espessura da chapa	Corrente	Velocidade de deslocamento	Pressão de ar
12,7 mm	80 A	6 m/min	6 bar

Fonte: Autor

Após a etapa descrita acima, as placas foram submetidas ao aplainamento das faces, de modo a retirar todo efeito térmico causado pelo processo de corte a plasma, mantendo a superfície perpendicular à largura da chapa. Na plaina também foi realizado os chanfros em X, porém para tornar possível esta atividade a morça do equipamento foi devidamente alinhada, utilizando-se um relógio comparador fixado ao cabeçote da plaina percorrendo a superfície de uma chapa parte do CP, alinhando a ferramenta de corte, o que permitiu a rotação da mesa no sentido desejado 30°, de acordo com instruções da AWS D1.1 (2010).

Para ajustar as folgas do equipamento decorrentes de desgaste, utilizou-se um calibre de folga para compensar as variações. Ainda, foram utilizados transferidores para garantir a correta inclinação do chanfro e paquímetro para avaliar as dimensões do nariz e profundidade do chanfro.

Para realizar os estudos foram demandadas 18 partes de 300x130x12,7mm, 4 partes de 300x13x12,7mm e 4 partes de 300x20x12,7mm, além do material necessário para caracterização do aço sem solda: uma amostra para espectroscopia de emissão óptica e três amostras para ensaio de tração com dimensão de 250x50x12,7mm.

3.3 METAL DE ADIÇÃO

O metal de adição adotado foi o SF-71 do fabricante *Hyundai Welding*, esta classe está associada ao E71T-1C com a norma AWS A5.20, indicado para utilizar com proteção gasosa de 100% CO₂. A classificação da norma AWS 5.20/5.20M (2005), dispõe as características do código alfa-numérico, sendo “E” indicação eletrodo para soldagem a arco elétrico; o primeiro algarismo numérico “7” informa o limite de resistência à tração do material já depositado, sendo este de 70 ksi; o algarismo “1” indica que este pode ser utilizado para soldagem em qualquer posição;

a letra “T” indica eletrodo tubular; e finalmente o numero “1” indica que a soldagem deve ser realizada em corrente CC e CO₂ como gás de proteção.

A composição química e características mecânicas estabelecidas pelo fabricante estão apresentadas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Composição química do metal de adição E71T-1C.

Consumível	C	Si	Mn	P	S
SF-71	0,04	0,49	1,29	0,01	0,009
AWS A5.20 E71T-1C (máx)	0,12	0,9	1,75	0,03	0,03

Fonte: Adaptado de Hyundai Welding Rev. 1.

Tabela 7: Propriedades mecânicas do metal de adição E71T-1C.

Consumível	Teste de Tensão		
	YS (Mpa)	TS (Mpa)	EL (%)
SF-71	548	582	28
AWS A5.20 E71T-1C	390 (min)	490-670	22 (min)

Fonte: Adaptado de Hyundai Welding Rev. 1.

3.3.4 Soldagem dos corpos de prova

Os equipamentos demandados para os experimentos de soldagem foram disponibilizados pela Universidade Federal do Rio Grande – FURG, do Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica (PPMec), realizados no Laboratório de Pesquisas em Soldagem (Lapes).

Os equipamentos demandados para a realização do presente estudo foram uma fonte de energia *Fronius* modelo transpuls synergic 5000, programada para operar no modo de tensão constante (CC). O cabeçote utilizado em conjunto com a fonte foi o modelo VR1500, com um sistema de acionamento externo, executando a liberação do gás de proteção, alimentação de arame eletrodo e possibilitando acionamento do processo de soldagem.

Outra necessidade é um sistema para deslocando da tocha com velocidade uniforme durante a soldagem, para isto aplicou-se uma estrutura automatizada criada

no próprio laboratório (Lapes), conforme Figura 13, que possibilita além do controle da velocidade alterar o ângulo de inclinação da tocha.



Figura 13: Dispositivo de deslocamento da tocha.

Fonte: Autor

A figura acima também demonstra o dispositivo de fixação dos CP's, utilizado para minimizar os efeitos de discipação do calor gerado na região estudada, mantendo assim, a condição de soldagem mais próxima da realidade encontrada em campo.

Os procedimentos de soldagem para todos os experimentos seguiram as mesmas características, sendo as diferenças apresentadas nos CPs proveniente apenas da variação da seção intermediária, que é o objeto de análise do presente estudo.

Para possibilitar a soldagem, os corpos de prova foram ponteados utilizando o processo de soldagem GMAW, com arame maciço e gás de proteção ativo (CO_2) devido a este não apresentar escória, o que poderia interferir na soldagem FCAW. Utilizou-se como gabarito para abertura da junta eletrodos de 1/8 in (3,18 mm). Para

evitar o deslocamento excessivo da seção de chapa inserida, esta foi ponteadada também no centro à uma distância equivalente dos pontos externos, na segunda junta (vide Figura 14).



Figura 14: Chapa ponteadada.
Fonte: Autor

Conforme indicado no capítulo 3.4 os corpos de prova possuem chanfro em duplo V ou X. Para realizar o enchimento total de cada junta necessitou-se aplicar quatro passes de soldagem, ordenados como indicado na Figura 15, gerando o total de oito passes por CP.

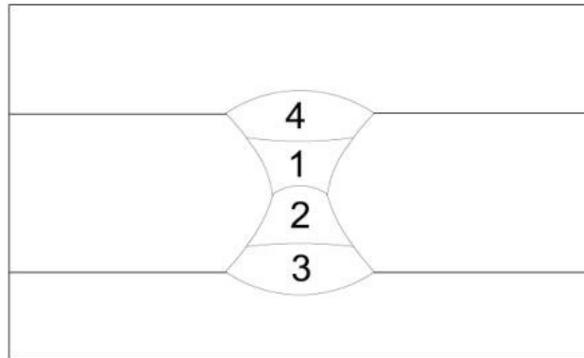


Figura 15: Sequência de passes.
Fonte: Autor

De acordo com as referências deste trabalho, entre os passes 1 e 2 foi necessário realizar a goivagem da junta, removendo toda escória e possibilitando a fusão completa da raiz. Para esta atividade são normalmente utilizados discos abrasivos nas aplicações em campo, sendo este o método aplicado a este trabalho. Para os passes 3 e 4 foi realizado apenas a remoção da escória por martelo picador e escova manual.

Estando os parâmetros para soldagem definidos, foi realizada a aquisição dos dados da soldagem com um equipamento de monitoramento, com capacidade de detectar os valores relativos à tensão, corrente e velocidade de alimentação a uma taxa de 5 mil pontos por segundo ou 5khz.

3.3.5 Caracterização microestrutural

Para realizar a avaliação da microestrutura gerada na zona fundida e na ZTA e também acerca dos elementos presentes no metal de base, foram preparadas amostras para avaliação da microestrutura gerada. Para tal, foi necessário preparar as amostras para imagens para macro e micrografias em microscópio óptico, e em microscópio eletrônico de varredura (MEV). E assim torna-se possível mensurar quantidade das fases presentes no material, tamanho de grão e microconstituintes para comparação com os materiais presentes na literatura.

A preparação das amostras para macrografia se deu cortando as amostras a partir dos corpos de prova, fazendo uso da cortadora metalografica visando a remoção das áreas afetadas pelo corte térmico perpendicular à direção de soldagem.

O procedimento para preparação das amostras se deu de forma manual, buscando evitar encruamento local, utilizando-se lixas d'água posicionadas em dispositivo realizado especificamente para preparação de amostras, havendo neste sistema um alimentador de água na parte superior mantendo a lixa em condições adequadas de uso.

Usualmente inicia-se o lixamento adotando lixas de granulometria grosseira como grão 60 e 80, promovendo assim maior retirada de material até que a superfície esteja plana. A partir deste momento as amostras já planas são lavadas, visando remover qualquer resquício do abrasivo da lixa, e aumenta-se o grau de acabamento trocando a lixa do dispositivo, esta já com menor granulometria. Sempre ao realizar a atividade descrita anteriormente deve-se girar a peça 90° fazendo com que as novas ranhuras da lixa mais fina sejam as únicas que permanecerão na peça, antes da próxima troca. Este procedimento é repetido até chegar a lixa 600.

Após esta preparação a amostra é submetida a ataque químico, que para o aço carbono é comumente utilizado o reagente Nital (Ácido Nítrico + Alcool) que pode apresentar diferentes percentuais de ácido nítrico em geral de 2 a 10%, para o presente estudo se fez o uso da composição contendo 3%. Para o ataque, expoe-se a face da amostra a uma imersão por aproximadamente 12 segundos.

Os procedimentos iniciais utilizados na preparação das amostras para análise de micrografia foram os mesmos utilizados para as amostras para macrografia, porém esta análise requer um aperfeiçoamento da superfície lixada, visto que, esta avaliação é realizada em maiores aumentos. Assim, se utilizou o lixamento das amostras até lixas com granulometrias muito finas (2200). Em seguida as amostras foram submetidas a polimento em politriz utilizando pano de polimento e alumina em suspensão de 2 μm . O processo se concluiu quando no polimento a superfície apresentava característica espelhada e sem marcas "riscos de lixa", concluindo a preparação para ataque químico.

Após a etapa de polimento e limpeza da superfície, essa foi submetida a ataque químico, realizado novamente utilizando os mesmos parâmetros e componentes descritos no item 3.3.5.1; realizando a limpeza do reagente com álcool e água e secando a amostra com auxílio de um secador, para que não houvessem marcas na visualização.

Para a obtenção das imagens, foi utilizado um microscópio Olympus-ims modelo GX51, e a manipulação destas imagens foi realizada no *Image Analysis* previamente instalado no microscópio e interligado a um computador, fornecendo assim as imagens já com escala adequada de acordo com a ampliação da lente.

O MEV utilizado foi o modelo JSM 6610 LV, marca Jeol localizada no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), possibilitando além da varredura da superfície atacada quimicamente, realizar análises quantitativa da composição química por espectrometria de energia dispersiva de raio-X (EDS).

3.3.6 Ensaios mecânicos

Os ensaios utilizados para comparar as características mecânicas dos corpos de prova com o padrão de referência foram os ensaios de tração, dobramento lateral e microdureza vickers.

Para a realização dos ensaios mecânicos foram necessários extrair as amostras dos corpos de prova, com a finalidade de atender as demandas das normas utilizadas para cada procedimento.

Os ensaios de tração foram realizados seguindo referências como o código ASME seção IX e AWS D1.1 adaptados para os corpos de prova com juntas paralelas, visto que esta configuração não apresenta norma específica, conforme Figura 16.

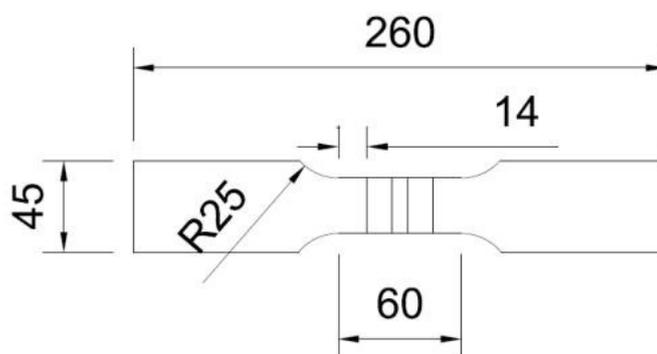


Figura 16: Croqui das amostras de tração

Para obtenção dos CPs, os mesmos foram submetidos a corte térmico utilizando equipamento de corte plasma, obtendo-se seções retangulares com

aproximadamente 50mm de largura. Para facilitar a realização das demais etapas logo após o corte foi realizado esmerilhamento de rebarbas provenientes do processo de corte térmico.

De acordo com as recomendações do código ASME as amostras para ensaio de tração, quando apresentam desvio de forma causada pelo processo de soldagem devem ser passar por processo de endireitamento a frio, antes que o reforço da solda seja removido. Para o desempenho, entretanto, as amostras foram submetidas a uma prensa hidráulica, minimizando os efeitos causados pela distorção na soldagem.

Após desempenadas, removeu-se o reforço das soldagens a partir de esmerilhamento, obtendo uma superfície plana com a chapa, porém esta ação em muitos casos não foi suficiente para manter a superfície totalmente alinhada, devido a presença de pequenas zonas de descontinuidade com mordeduras e falta de fusão causadas pelo desvio do arco elétrico durante o processo de soldagem. Sendo assim, foi necessário executar, em alguns casos, o aplainamento das faces (área útil das amostras).

Uma vez retirado o reforço, os CPs foram submetidos à usinagem. O primeiro passo para a realização da usinagem no CP foi desenvolver um suporte que possibilitasse a fixação adequada para a remoção de material da seção transversal a ser ensaiada. Para tal, foi confeccionado um dispositivo composto de um tubo de seção quadrada com 3mm de espessura de parede e 25mm de lado, soldado a uma prancheta de aço 2"x1/2" polegadas. No tubo foram realizados furos para inserção de parafusos passantes, conforme indicação da Figura 17.



Figura 17: Dispositivo de fixação
Fonte: Autor

O dispositivo foi fixado ao carro móvel de um torno mecânico universal; para o posicionamento adequado foi realizada medição com relógio comparador posicionado na placa de castanhas e ajustado ao carro móvel, para que o sistema permanecesse perpendicular à ferramenta de corte. A ferramenta utilizada foi uma fresa de 8 gumes cortantes fixada à placa de castanhas de 50mm de diâmetro, atendendo assim o disposto no item QW-462(a) da ASME para corpos de prova de seção reduzida. Para possibilitar a fixação das amostras foi necessário realizar dois furos guias na região de agarramento das amostras quando testadas.

Por último, os CPs passaram pelo aplainamento das faces da seção útil do corpo de prova. Esta etapa é necessária para remover os defeitos superficiais causados pelo processo de soldagem e garantir o paralelismo das faces, minimizando os erros provenientes do acúmulo indevido de concentradores de tensão.

Os ensaios de dobramento lateral seguiram as mesmas normas utilizadas para a preparação das amostras do ensaio de tração: ASME seção IX e AWS D1.1. Para cada corpo de prova soldado foram retiradas duas amostras para dobramento lateral seguindo o quadro QW-462 do código ASME necessários para a qualificação de desempenho das juntas soldada.

Para a retirada das amostras optou-se por realizar corte térmico perpendicular às soldas. Estes foram realizados por equipamento de corte plasma, gerando assim a necessidade de usinagem posterior de no mínimo 3mm conforme indicado nas referências normativas. Etapa esta que foi realizada após o desempenho e remoção dos reforços dos cordões de solda. Após a amostra foi submetida ao aplainamento de suas faces laterais, e esmerilhamento dos reforços do metal de adição.

O ensaio de dobramento lateral pode ser realizado de diferentes formas como: dobramento guiado ou com uso de roletes. Para este trabalho foi escolhido o segundo método. Esta escolha foi baseada no fato de este dispositivo ter sido desenvolvido especialmente para ensaios de aços com módulo de elasticidade superior a 355 MPa, contendo um cutelo de 50,8mm de diâmetro.

Os ensaios de microdureza foram realizados seguindo as recomendações da norma ASTM 384 (ASTM, 2012). A determinação da dureza do material foi realizada traçando-se o perfil de dureza de centro a centro das soldagens para as amostras

provenientes dos CP's de teste, e um perfil de 10 medições de identações para as amostras de referência, realizando-se três perfis para cada amostra.

O equipamento utilizado para realização dos ensaios foi o Shimadzu modelo HV 2, equipamento este disponível no laboratório de usinagem da FURG.

Para o ensaio, a amostra foi fixada com auxílio da morça do equipamento, impedindo possíveis deslocamentos e contribuindo para redução da incerteza de medição. As medidas de dureza foram realizadas pelo equipamento a uma distância de 2 mm da superfície da chapa, utilizando penetrador de base piramidal fixado ao dispositivo de aplicação de pressão automático da máquina. A carga utilizada de 4,94 N (HV 0,5), aplicada durante 15s e distância de 1mm entre identações.

Posteriormente, foram obtidas as curvas de dureza do material avaliadas conforme o tipo de amostra. Para a referência o perfil foi realizado com 10 identações por perfil, totalizando 30 pontos. Já nas amostras do tipo 1, devido a seção inserida apresentar 13mm e a abertura da raiz ser de 3,2mm, foram realizados 17 pontos por perfil para garantir a abrangência total da área a ser estudada, totalizando 204 pontos distribuídos nas 4 amostras. Seguindo o mesmo raciocínio das amostras do tipo 1, para as amostras do tipo 2 demandaram 25 identações em cada perfil, sendo necessário realizar um total de 300 pontos de medição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos relativos às condições de soldagem, análises de macrografias, microestrutural, ensaios de tração, e dobramento.

4.1 AVALIAÇÃO DO METAL UTILIZADO

Para o desenvolvimento do estudo foram utilizadas chapas de aço com composição química e as propriedades mecânicas estabelecidas pela mesma norma apresentadas nas Tabelas 1 e 2. O resultado de composição química para as chapas utilizadas está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO AH36.

ASTM A131/A131M – 94			Chapa Utilizada
Elemento Químico	Símbolo	Composição	Composição
Carbon, max	C	0,18	0,08
Manganese	Mn	0,9-1,6	1,41
Phosphorus, max	P	0,035	0,01
Sulfur, max	S	0,04	0,01
Silicon	Si	0,1-0,5	0,28
Niquel, max	Ni	0,4	0,01
Chromium, max	Cr	0,25	0,01
Molybdenum, max	Mo	0,08	0,001
Copper, max	Cu	0,35	0,01
Niobium, max	Ni	0,05	0,03
Vanadium, max	V	0,1	0,001

Fonte: Adaptado de ASTM A131/ A131M – 94 Standard Specification for Structural Steel, 2001.

Com estes resultados, foi possível avaliar a composição química do metal a ser estudado e compará-lo às referências normativas. Através do cálculo do carbono equivalente, que resultou no valor demonstrado abaixo, constatou-se a classificação do aço.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} = 0,08 + \frac{1,41}{6} + \frac{0,01+0,001+0,01}{5} + \frac{0,01+0,01}{15} = 0,339$$

Após obtidos os resultados de análise química, foram realizados três ensaios mecânicos nas chapas não soldadas, os valores obtidos estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9: Características mecânicas do metal de base.

Corpo de Prova	Tensão no escoamento (Mpa)	Tensão Máxima (Mpa)	Alongamento na ruptura (%)
CP1	369,86	496,26	32,50
CP2	371,26	498,4,00	30,00
CP3	370,88	497,33	31,88
Média	370,67	497,33	31,46
Desv. Padrão	0,72	1,07	1,30
Mínimo	369,86	496,26	30,00
Máximo	371,26	498,40	32,50

Fonte: Autor

Os resultados acima expostos corroboram para a classificação do aço como um aço ASTM A131/131 M Gr. AH-36, visto que de acordo com a referência normativa indicada na seção 3.2.1. deste trabalho, todos os valores das três amostras ensaiadas mantiveram-se acima da tensão de escoamento mínima de 355 MPa, e com tensões máximas entre os limites 490 MPa inferior e 620 MPa superior. Com estes resultados verificados, concluindo que a chapa atende as especificações exigidas por norma, pode-se dar sequência ao estudo.

4.2 SOLDAGEM

A limitação da aplicação da soldagem indicada pela IACS é o principal ponto abordado neste estudo, por este motivo a metodologia adotada no presente trabalho foi executar experimentos onde as condições estivessem abaixo dos limites pré-estabelecidos, visando a reprodução de condições próximas a execução aplicada em campo, limitando alguns fatores que, em geral, são variáveis incontroláveis em processos onde se aplica a soldagem manual. Assim, para este estudo foram realizadas soldagens contínuas na posição puxando com parâmetros de velocidade de deslocamento, tensão de entrada, DBCP e velocidade de alimentação constantes, buscando-se obter condições que permitisse a comparação de resultados.

Os parâmetros de soldagem estabelecidos nos corpos de prova para parametrização indicados no item 3.2.2. foram definidos de acordo e estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Parametros definidos para soldagem (Junta 1).

Nº	V_{alim}	V_{desloc}	DBCP	Vazão	Tensão	Corrente (média)	Abertura da raiz	Energia de soldagem
Passe	(m/min)	(cm/min)	(mm)	(l/min)	(V)	(A)	(mm)	(J/mm)
1	6,7	22,6	20	14	24,5	165,6	3	1077,13
2	7,2	25,1	20	14	24,5	175,4	-	1027,24
3	7,2	25,1	20	14	24,5	170,0	-	995,62
4	7,0	24,1	20	14	24,5	162,2	-	989,35

Fonte: Autor

Os dados acima mencionados na Tabela 10 foram aplicados a condição proposta neste trabalho, e se percebeu uma limitação para aplicação: a diferença causada logo após a execução do primeiro passe de raiz, este passe provocou deslocamento térmico na chapa inserida, mesmo esta estando pontuada no intervalo de 150mm. Este deslocamento é visível na Figura 18, onde as regiões pré-fixadas mantiveram a abertura inicial e as demais sofreram alargamento da abertura da raiz para a segunda junta. Consequentemente, ao realizar a soldagem por trás da raiz do primeiro passe estas regiões demandaram maior penetração.



Figura 18: Variação da abertura de raiz da segunda junta.
Fonte: Autor

Esta alteração ocorreu de forma mais ativa nos CP's para a condição 1 de teste, os quais possuem a menor seção inserida.

Com a variação da abertura da raiz para o segundo passe, os parâmetros aplicados não se apresentaram eficientes, visto que em alguns casos o consumível tendeu a penetrar na junta, devido a grande abertura da raiz e a velocidade de deslocamento da tocha. Para resolver tal problema, a segunda raiz teve a velocidade de deslocamento reduzida, que resulta em um aumento na energia de soldagem imposta na segunda soldagem, o que influencia diretamente o tamanho da ZAC, como descrito no capítulo 2.3. Os parâmetros utilizados para a segunda junta estão expostos na Tabela 11. Outra influência causada pelos passes de raiz descritos acima foi verificada na goivagem realizada atrás das raízes, notou-se que a primeira junta apresentava pouca penetração nas regiões onde houve o deslocamento lateral da inserida

A goivagem foi realizada por trás das duas juntas após soldagem, utilizando-se os mesmos critérios adotados nos testes preliminares, utilizando-se disco abrasivo

para remoção de toda a escória. Porém, como as duas juntas apresentaram profundidade de penetração distintas, foi estabelecido o critério de retirar apenas o necessário (até a junta não apresentar escória visível, como acontece normalmente em aplicações em campo), resultando em perfis de cordões ligeiramente diferentes entre si.

Tabela 11: Parametros definidos para soldagem (Junta 2).

Nº	Valim	Vdesloc	DBCP	Vazão	Tensão	Corrente (média)	Abertura da raiz	Energia de soldagem
Passe	(m/min)	(cm/min)	(mm)	(l/min)	(V)	(A)	(mm)	(J/mm)
1	6,7	22,0	20	14	24,5	173,0	3	1155,95
2	7,2	27,1	20	14	24,5	161,0	-	873,32
3	7,2	23,8	20	14	24,5	164,9	-	1018,50
4	7,2	23,6	20	14	24,5	167,4	-	1042,70

Fonte: Autor

Após as etapas mencionadas acima foram executadas as soldagens do segundo, terceiro e quarto passe para as duas juntas, mantendo-se sempre os parâmetros iguais para as duas aplicações.

Depois de soldadas, as juntas foram cortadas transversalmente aos cordões, como descrito no Capítulo 3.9.1.1.1, e pôde-se perceber que a primeira junta em todos os CP's apresentou características de falta de fusão ao longo de algum segmento da junta, quando este não estava presente em toda a extensão. Pode-se inferir que a poça de fusão não teve condições para fundir totalmente a região do chanfro, gerando esta descontinuidade. Porém, para a segunda junta este fenômeno não aconteceu, visto que esta junta possibilitou maior penetração, devido ao deslocamento causado pela primeira soldagem ter causado aumento da abertura de raiz, facilitando a penetração. Cabe ressaltar esta ocorrência mesmo que, conforme estudo comparativo realizado por Starling et. al (2009), o arame tubular rufílico tende a possuir a maior eficiência de deposição para o gás CO₂.

4.3 MACROGRAFIA

A partir do ensaio macrografico é possível visualizar as diferentes regiões de uma junta soldada. Conforme visualizado na Figura 19, podemos identificar a sequência de passes utilizados considerando a indicação da seguinte forma: Material adicionado na soldagem (MA) seguido do número referente ao passe de soldagem; zona termicamente afetada externa (ZTA-E) lado da continuação da chapa; zona

termicamente afetada interna (ZTA-I) local onde o material de base (MB) está alocado entre as juntas.

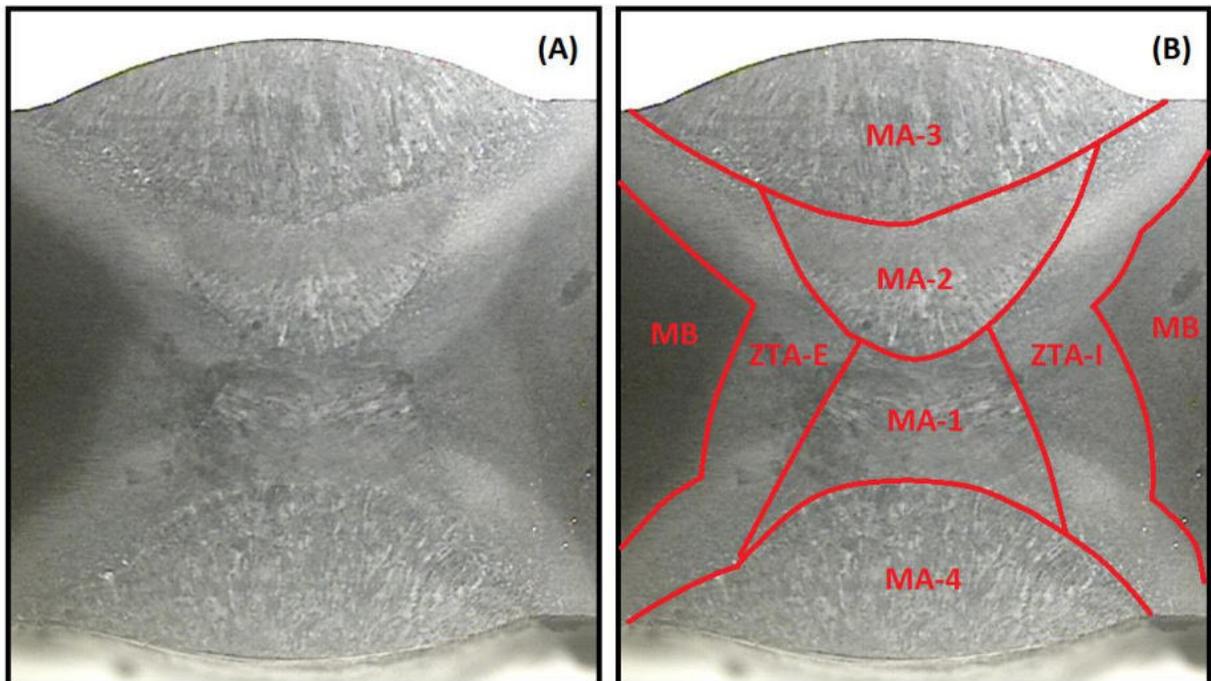


Figura 19: Zonas atacas quimicamente (A) e identificação (B).

Fonte: Autor

A partir das macrografias realizadas, é possível obter a variação da largura da ZTA para correlacionar seus valores com o quantitativo de energia imposta na junta. Utilizando o software de análise de imagens Imagem J, foram realizadas as medições como ilustrados pelas Figuras 20, para a amostra de referência; Figura 21, para uma amostra 2PM do grupo 1; e Figura 22, para uma amostra 4GM do grupo 2.

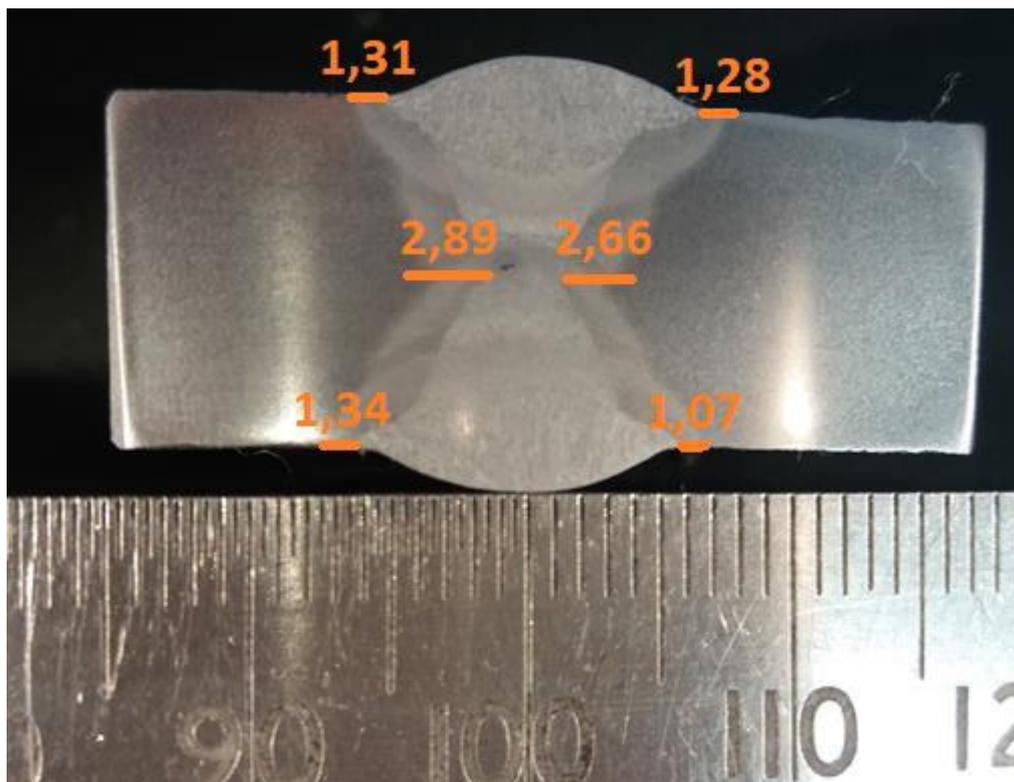


Figura 20: Macrografia amostra de referência. Dimensões em (mm).
Fonte: Autor

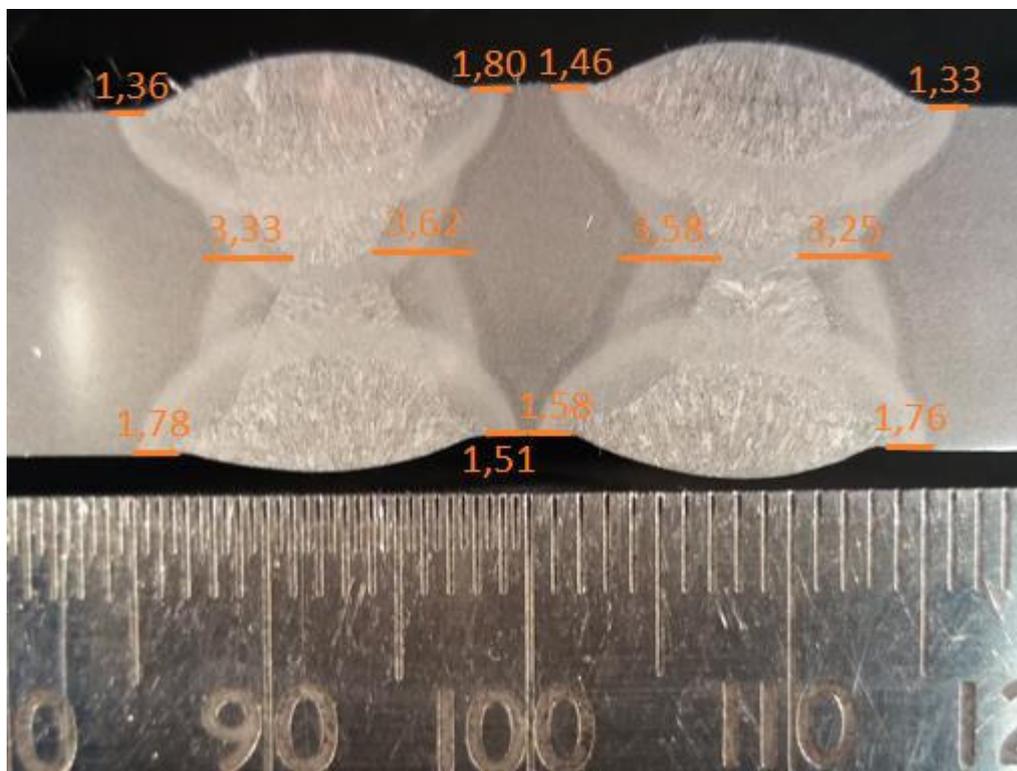


Figura 21: Macrografia amostra 2PM. Dimensões em (mm).
Fonte: Autor

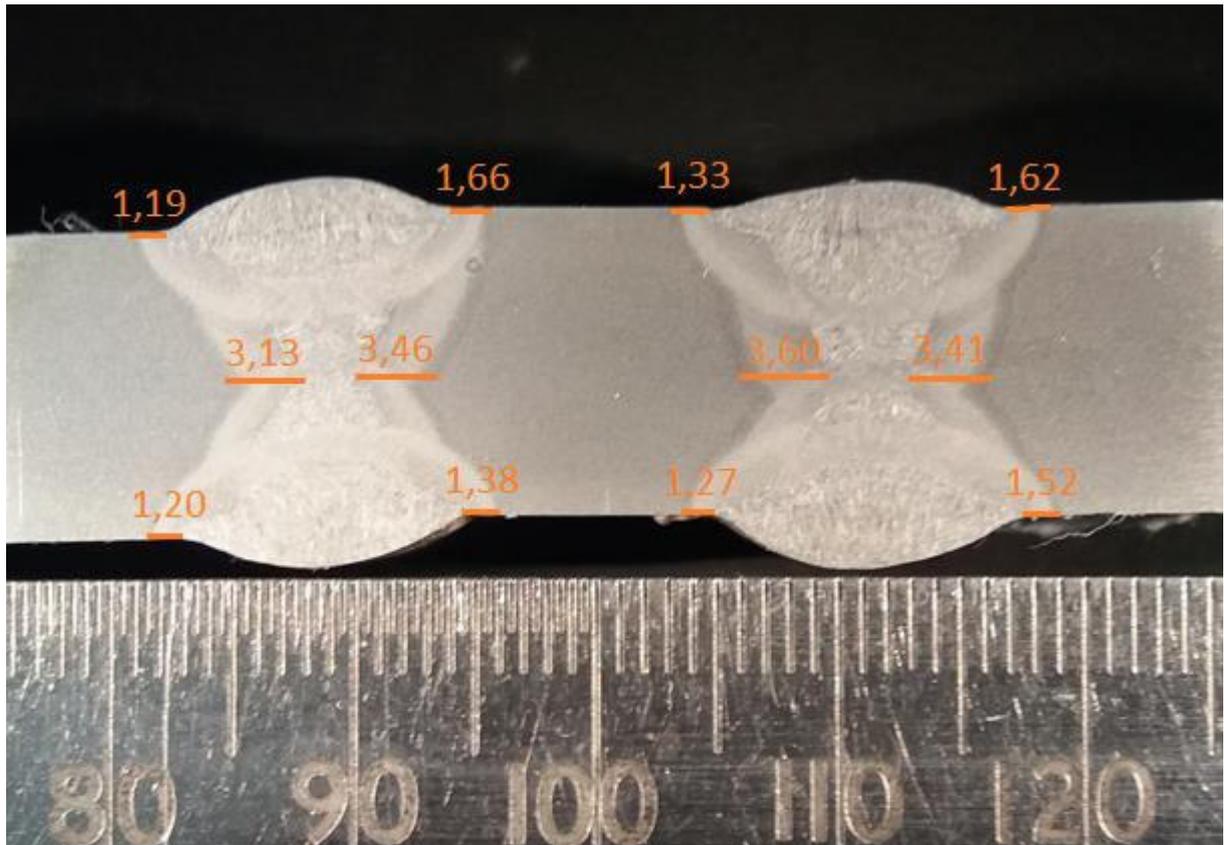


Figura 22: Macrografia amostra 4GM. Dimensões em (mm).
Fonte: Autor

Abaixo, na Figura 23 é apresentado o detalhamento da variação do comprimento da ZTA ao longo dos passes, verificando-se a variação da largura da seção compreendida para a primeira junta quando comparada a segunda, onde a última apresenta maior extensão de ZAC, este fato se dá em função da maior energia de soldagem demandada para soldagem da raiz de junta 2. Fato este atribuído a abertura do nariz causada pela soldagem da junta 1, conforme já mencionado no item 4.2 deste trabalho.

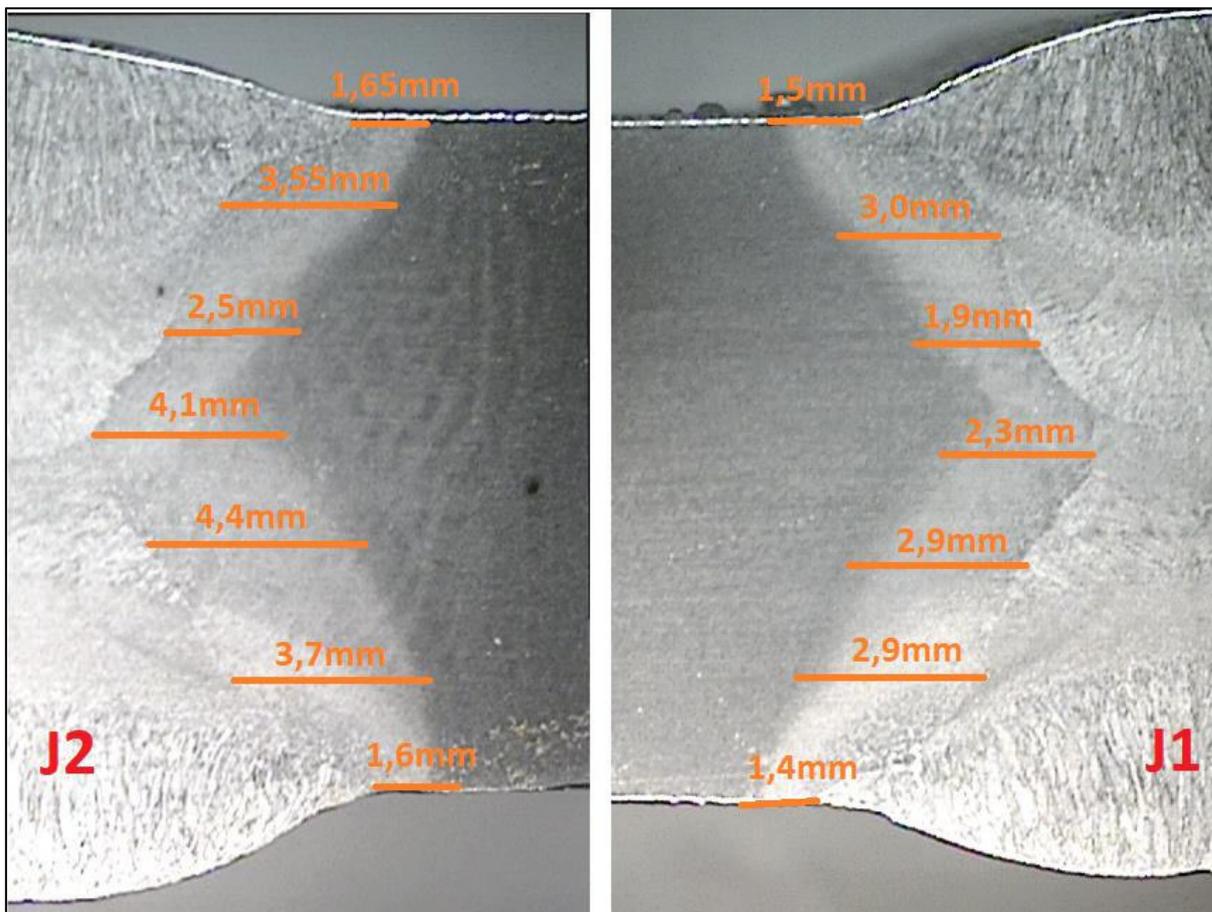


Figura 23: Detalhamento das dimensões da ZTAs da amostra 4GM.
 Fonte: Autor

A partir das análises destes resultados, foi possível calcular os valores médios encontrados para a largura da ZTA na superfície em cada cordão de solda, bem como traçar uma tendência da distância entre cordões geradas pelos experimentos. Estes dados estão apresentados na Tabela 12. Valores estes condizentes com as referências encontradas em De Melo (2016) e Da Silva (2018).

Tabela 12: Largura da ZTA.

Grupo	Largura média da ZTA (mm)	
	ZTA-I	ZTA-E
1	1,46	1,64
2	1,35	1,43

Fonte: Autor

4.4 MICROESTRUTURA

Na avaliação microestrutural, foram verificadas as fases presentes no material e na região proveniente da soldagem. Estas fases foram comparadas às características mencionadas pela literatura e, também, às características mecânicas encontradas nos demais ensaios realizados neste estudo. As imagens ilustradas neste capítulo se referem a estrutura próxima à face da chapa, exceto quando indicado na figura.

4.4.1 Metal de base

A avaliação microestrutural teve como intuito verificar a possível influência de uma junta sobre a outra, investigando principalmente alterações que possam impactar em características mecânicas de dureza e resistência. Para isso, foi comparado áreas externas às juntas (lado oposto à seção inserida) com a microestrutura na região impactada pelas duas juntas.

A avaliação se inicia pela constituição do material de base que apresenta matriz ferrítica (grãos claros) e também perlita (fase em tons de cinza) conforme é demonstrada nas Figuras 24 e 25, onde as amostras foram atacadas com reagente Nital 2%. Esta disposição das fases está associada a presença de baixo teor de carbono e nota-se uma estrutura bandeada na matriz assim como observado nos trabalhos de Ribeiro (2015) e Maciel (2014). A estrutura bandeada é devido ao processo de fabricação que, nestes casos, costuma ser laminação.

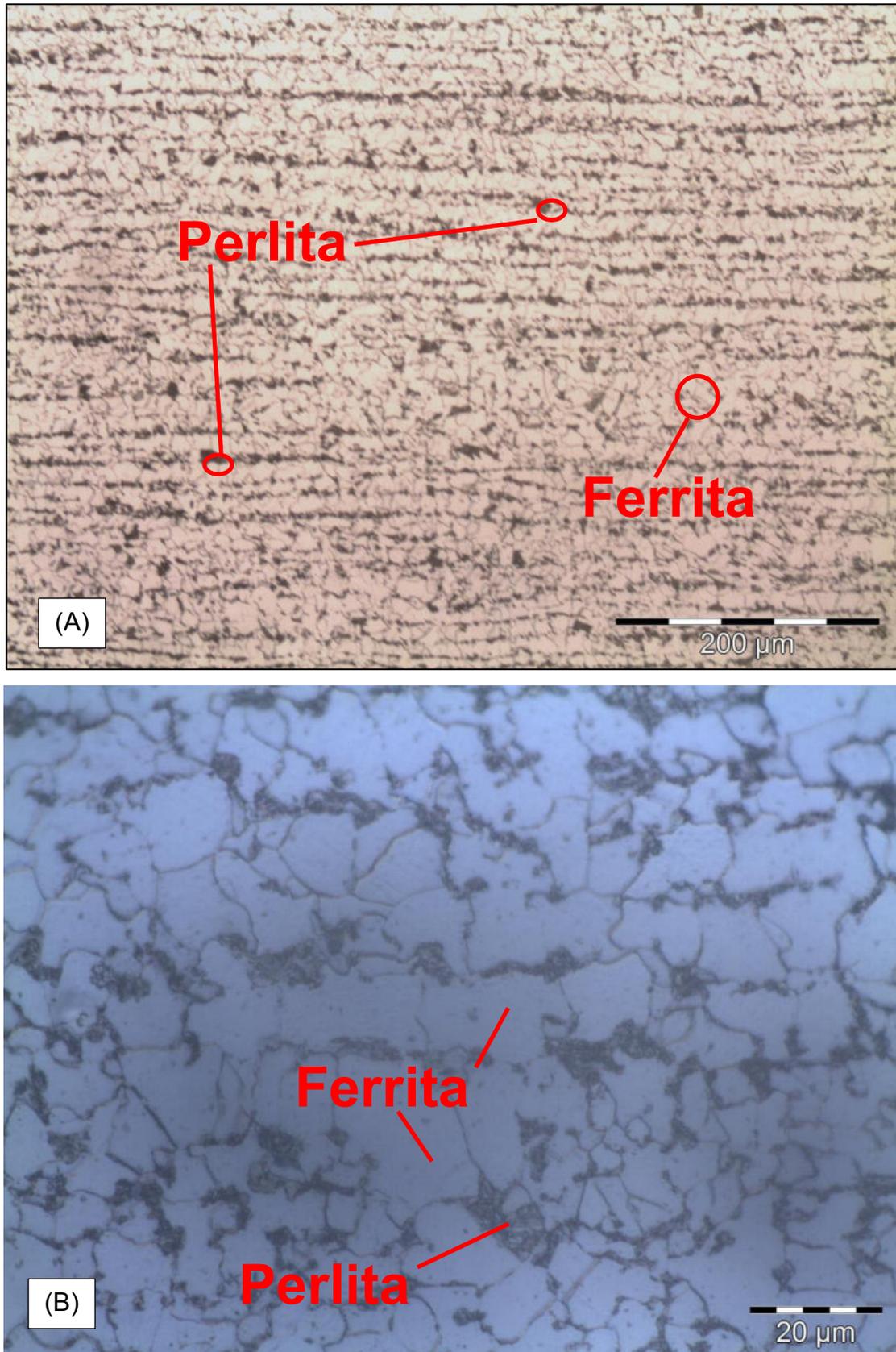


Figura 24: Materia de base, em diferentes aumentos (A) 50X e (B) 1000x.
Fonte: Autor.

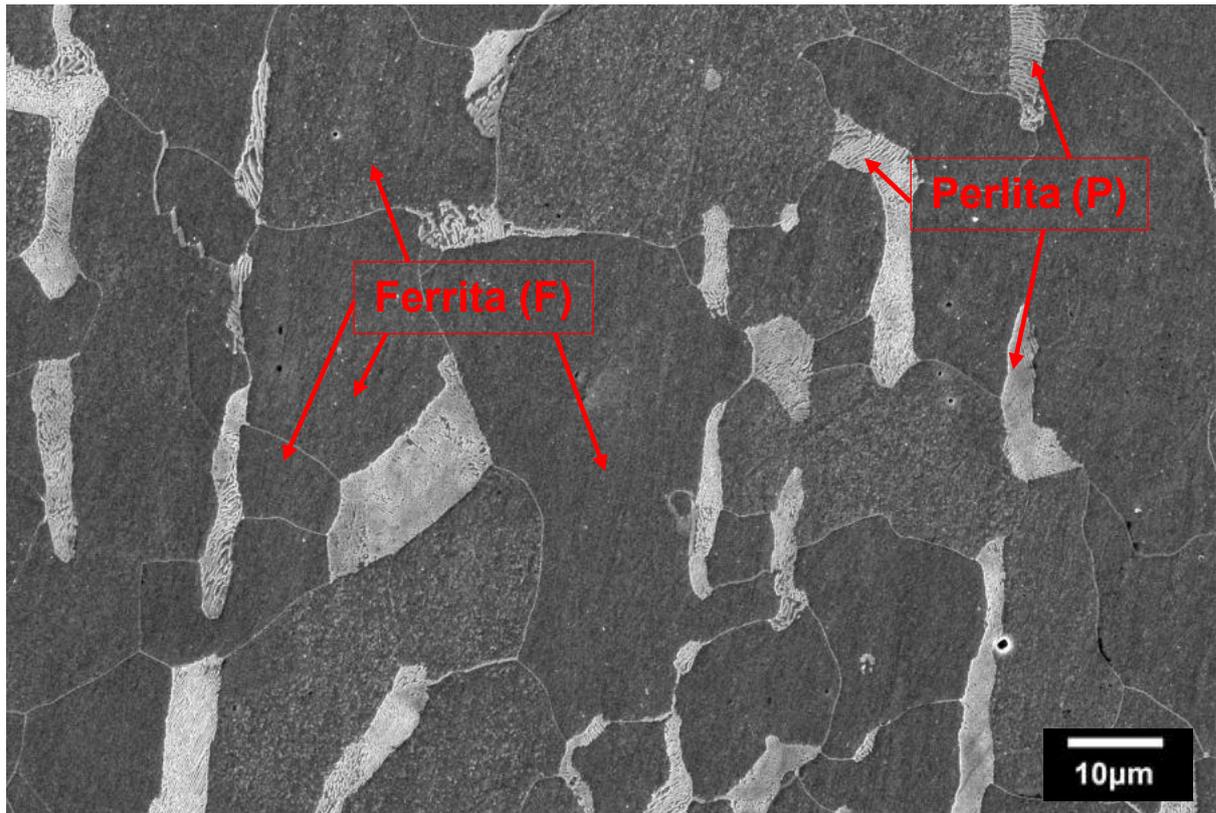


Figura 25: Material de base, imagem obtida por MEV.
Fonte: Autor.

4.4.2 Zona de refino de grão

É a primeira região encontrada partindo do material de base em direção a zona fundida, onde a transformação acontece de forma mais atenuada, mantendo-se assim os microconstituintes presentes no material de base, porém o efeito térmico é responsável por gerar uma recristalização parcial, porém não suficiente para dissolver todos os precipitados.

Nesta região pode ser encontrado os microconstituintes presentes nas Figuras 26 e 27, detalhados como Perlita (P) fase escura na imagem obtida por microscopia óptica e também formas ligeiramente diferentes de ferrita fase (α) demonstradas como ferrita poligonal (PF) e ferrita quase poligonal (QF).

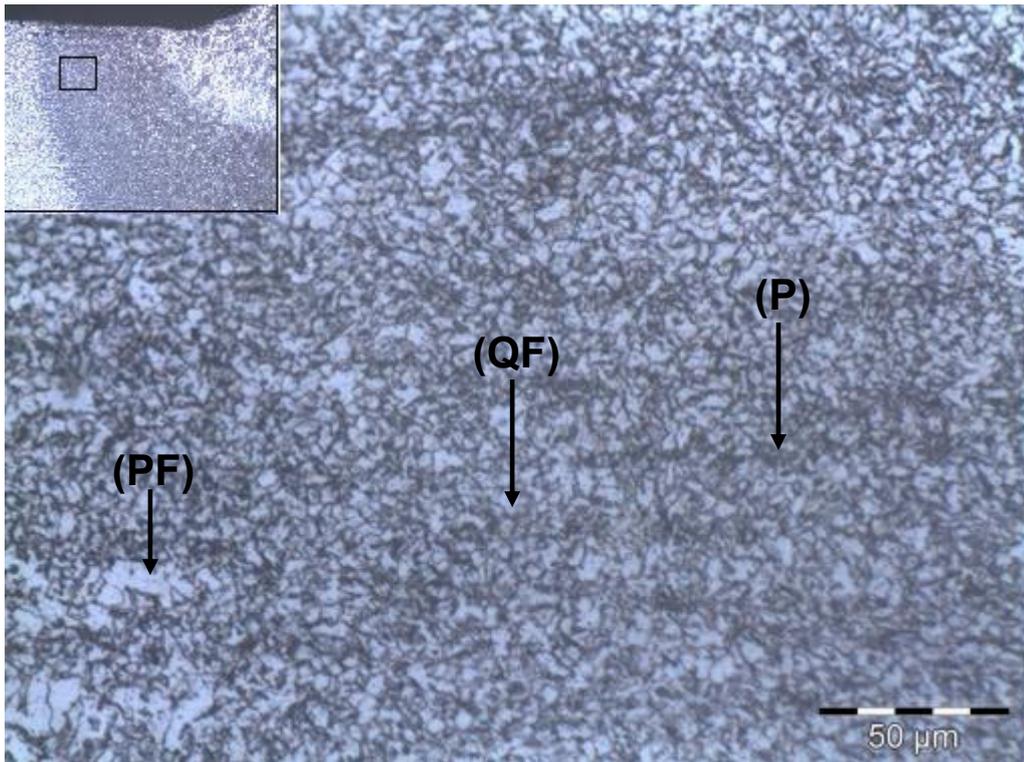


Figura 26: Zona de refino de grão da amostra 2PM.
Fonte: Autor.

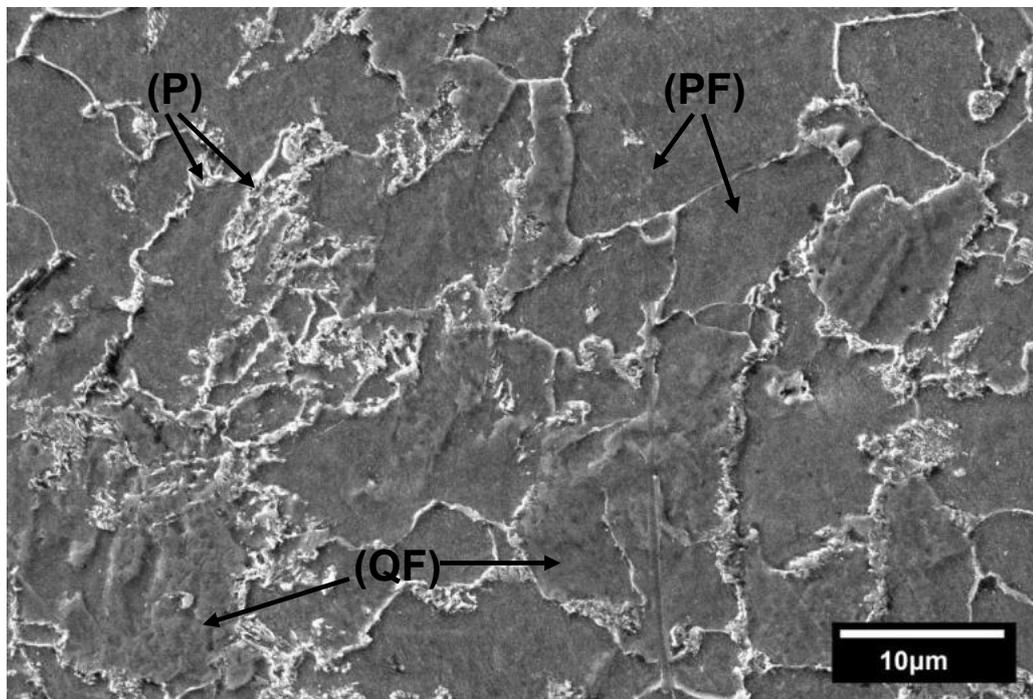


Figura 27: Zona de refino de grão da amostra 2PM, em maior ampliação.
Fonte: Autor.

4.4.3 Zona de crescimento de grão ou zona de transformação

A zona de transformação ou crescimento de grão é aquela a qual sofre as maiores influências térmicas, levando a grandes variações microestruturais. Como se observa na Figura 28. Nota-se a diferença entre as regiões delimitadas pela linha de fusão e na região adjacente em direção ao material de base. Percebe-se precipitados em forma de pequenas agulhas, característica de surgimento de bainita, fase de elevada dureza. Indicado nas Figuras 28 e 29 e também encontrada por Osório Et al (2016).

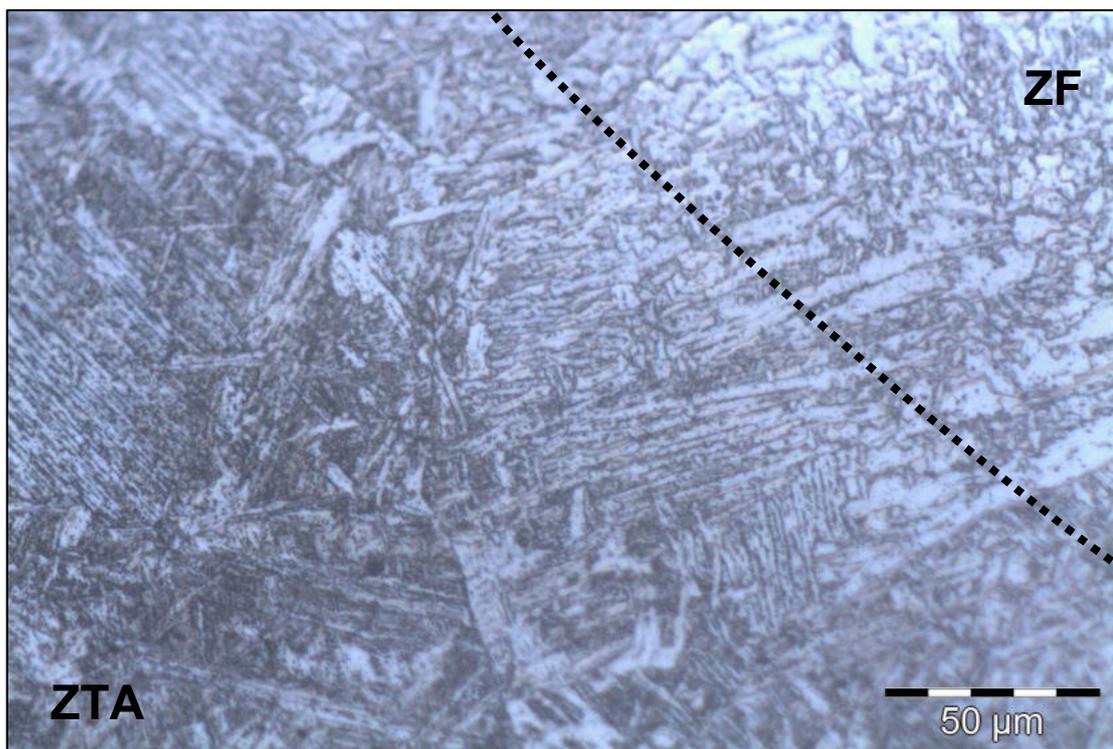


Figura 28: Região de transição entre ZTA e ZF.
Fonte: Autor.

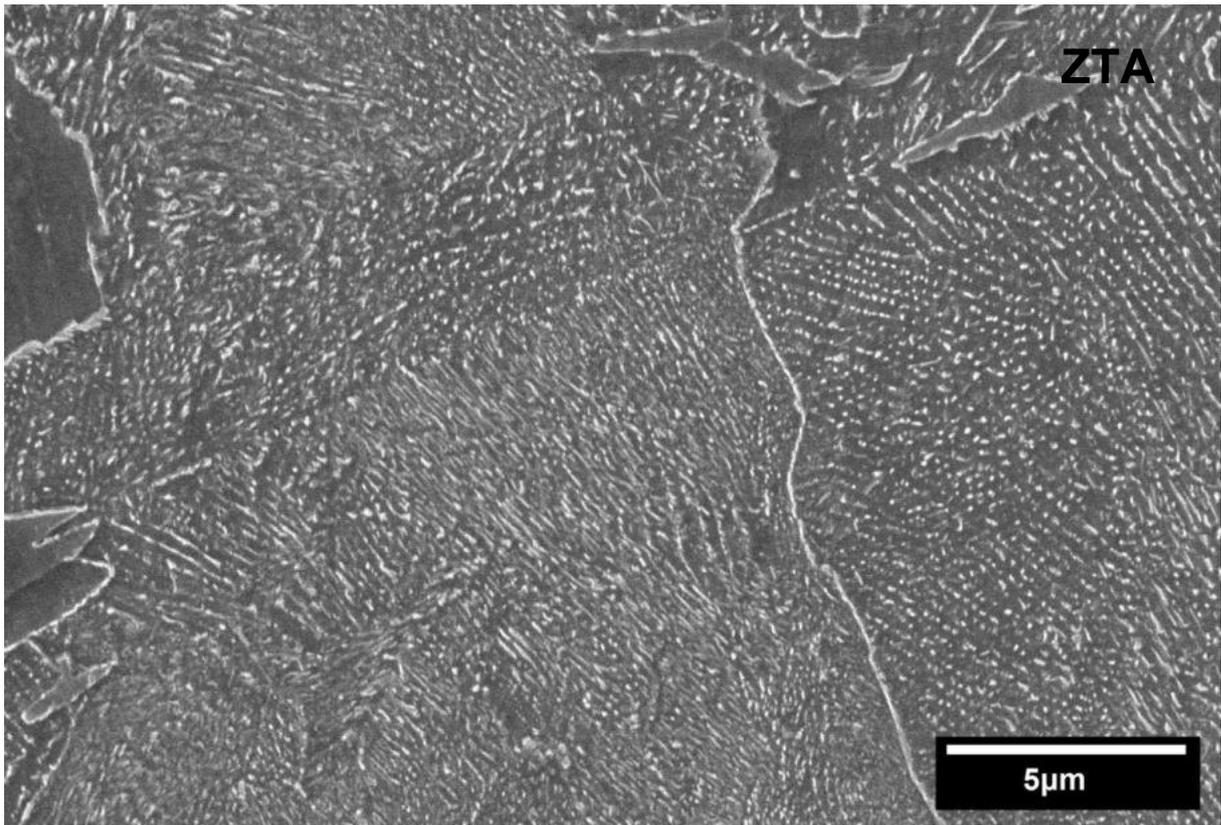


Figura 29: Imagem MEV zona de transformação ampliação de 5000x.
Fonte: Autor.

Já a Figura 30, indica um crescimento de grão caracterizando o surgimento da ferrita Widmanstätten que podem surgir por dois mecanismos diferentes: um partindo de placas paralelas separadas por austenita no processo de transformação, ou por nucleação direta nos contornos de grão da austenita que não foram transformados em ferrita poligonal, como demonstrado também no trabalho realizado por Ribeiro (2015). Esta região está compreendida entre a zona de refino de grão e as adjacências da zona com presença de bainita indicadas na Figura 28.

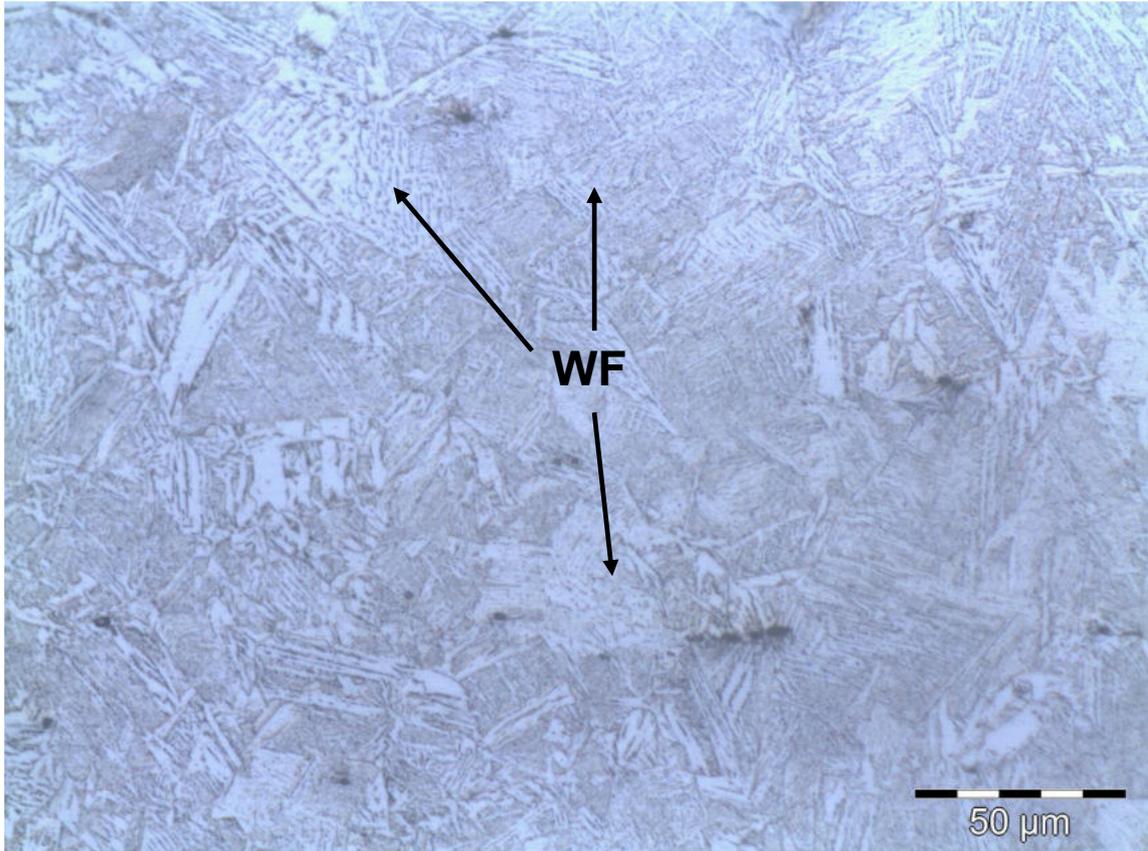


Figura 30: Zona de transformação.
Fonte: Autor.

4.4.4 Zona fundida

Na avaliação da microestrutura da zona fundida, proveniente do metal de adição foi possível identificar as seguintes microestruturas, ferrita Widmanstätten (WF), perlita (P) e ferrita poligonal ou quase poligonal (PF).

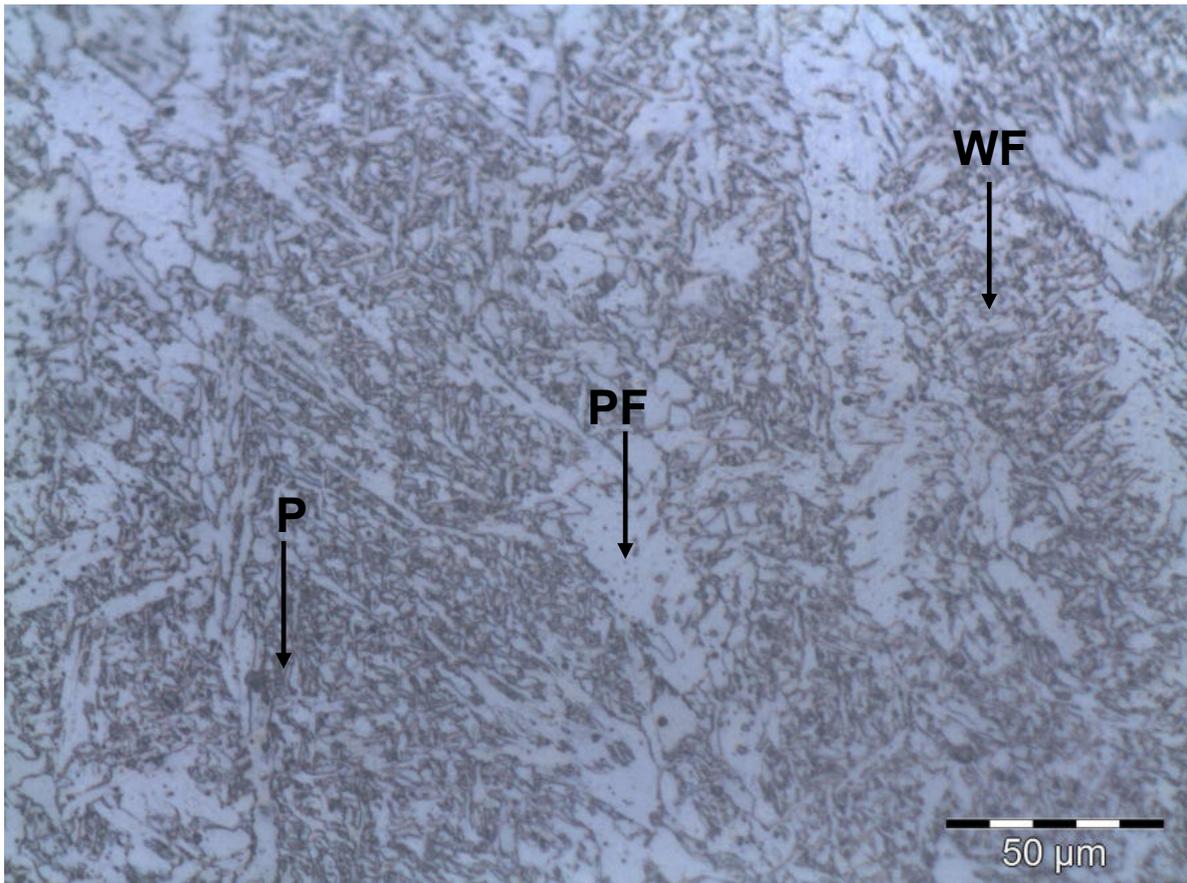


Figura 31: Zona fundida amostra 6P, junta 2.
Fonte: Autor.

4.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados para as duas condições propostas neste estudo e também para a referência utilizada. Para cada CP das condições 1 e 2 foram extraídas duas amostras, totalizando 8 amostras para cada condição. Já para o CP de referência foram obtidas 3 amostras.

4.5.1 Amostras de referência

Os ensaios realizados para as amostras de referência resultaram em ruptura fora da solda e ZTA, os dados de tensão de escoamento e tensão máxima apresentaram-se dentro dos parâmetros descritos pela norma utilizada para o material de base e estão demonstrados pela Figura 32 e Tabela 13.

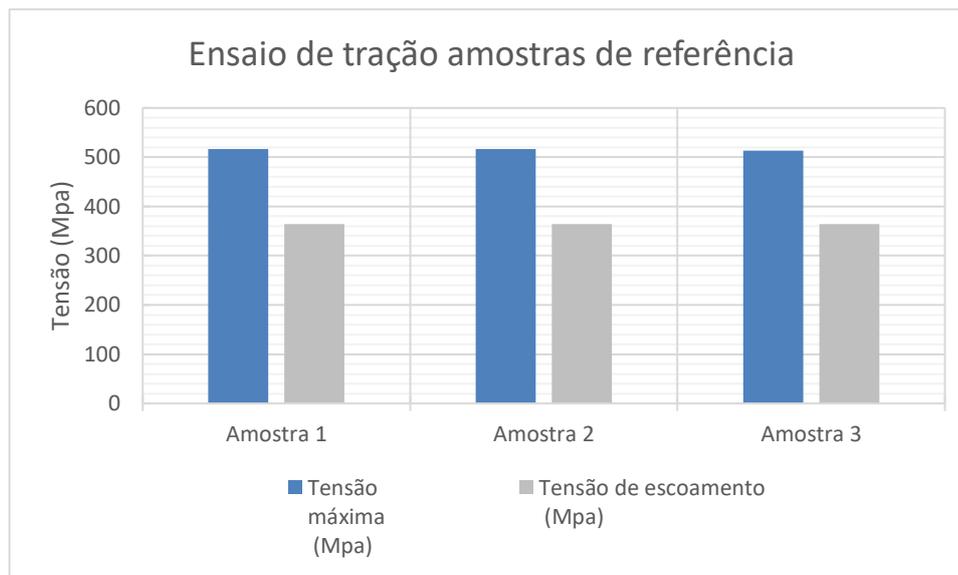


Figura 32: Tensões - ensaios de tração amostras de referência.

Tabela 13: Resistência a tração amostras de referência.

Nº	Tensão máxima (Mpa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Alongamento na ruptura (%)
Amostra 1	516,11	364,34	42,72
Amostra 2	516,84	364,72	43,25
Amostra 3	513,09	364,09	46,25
Média	515,35	364,38	44,07
Des. Padrão	1,99	0,32	1,90

Como descrito na Tabela 13 acima, os valores não apresentaram variação significativa entre si, visto que esses são provenientes da mesma chapa, ainda que a posição de ajuste para soldagem tenha sido realizada de forma manual.

A amostra 3 apresentou uma pequena descontinuidade de inclusão de escória, provavelmente originada pela goivagem insuficiente da raiz. Porém, mesmo contendo esta descontinuidade a integridade da solda não foi afetada pelo ensaio, como demonstro na Figura 33, não houve nenhuma alteração ou crescimento de trinca nos pontos acima citados.

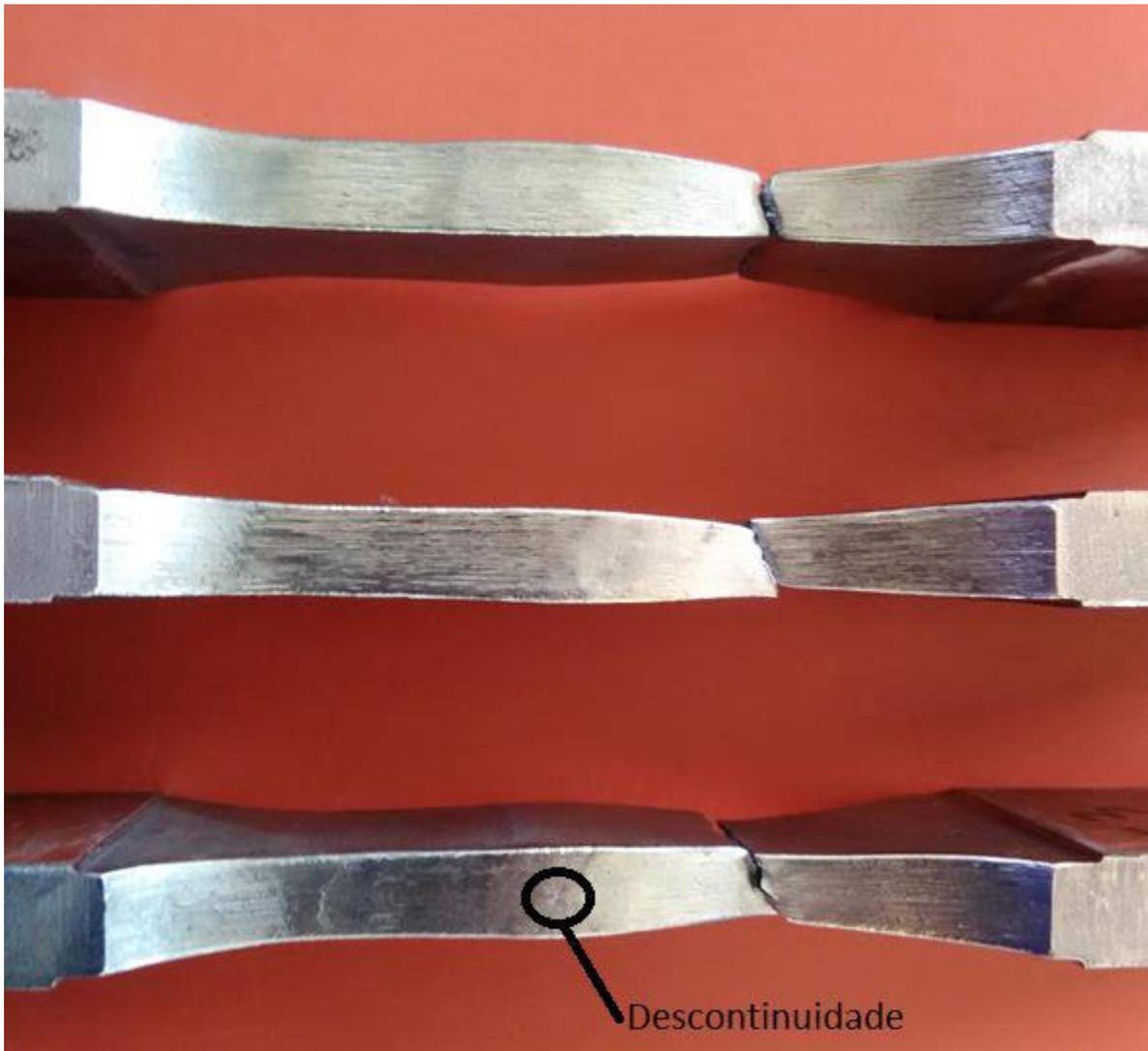


Figura 33: Vista lateral das amostras de referência rompidas nos ensaios de tração.
Fonte: Autor.

4.5.2 Amostras grupo 1

Para esta condição foram ensaiadas 2 amostras por CP, totalizando 8 amostras, os valores obtidos nos ensaios estão dispostos na Figura 34 e na Tabela 14.

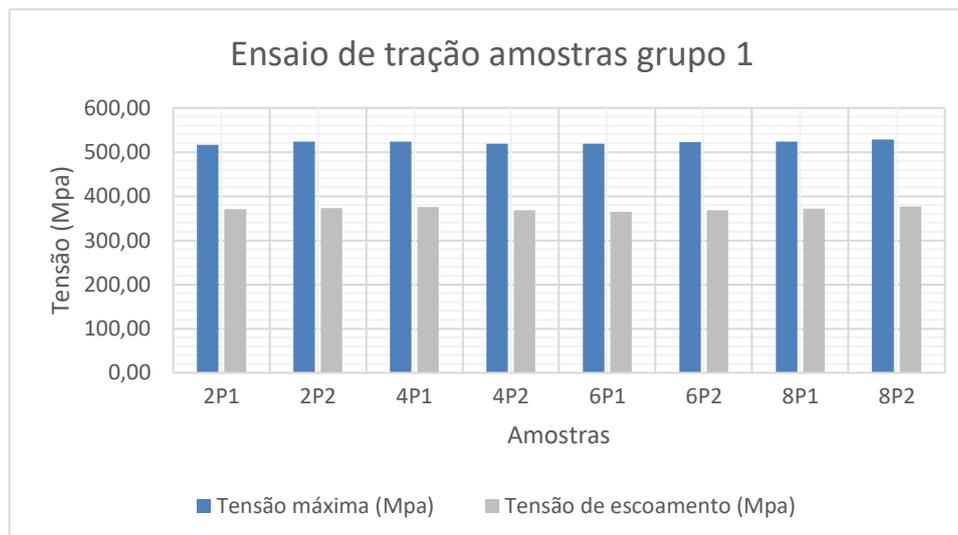


Figura 34: Ensaio de tração amostras grupo 1.
Fonte: Autor.

Tabela 14: Resistência a tração amostras grupo 1.

Identificação amostra	Tensão máxima (Mpa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Alongamento na ruptura (%)
2P1	516,42	370,40	42,35
2P2	523,97	373,03	42,66
4P1	523,56	375,94	36,13
4P2	518,33	368,25	35,49
6P1	519,00	365,14	31,19
6P2	521,99	367,83	38,23
8P1	524,00	372,13	34,89
8P2	528,53	376,42	38,27
Média	521,98	371,14	37,40
Des. Padrão	3,65	3,73	3,60

Fonte: Autor.

Das amostras acima mencionadas, vale destacar a amostra 2PT1, que foi a única dentre as ensaiadas que sofreu ruptura na solda. Acredita-se que isto ocorreu devido ao acúmulo de descontinuidades provenientes da segunda solda, visto que esta amostra foi a primeira realizada e ocorreram problemas quanto a penetração do arame eletrodo. Foram encontradas dificuldades para estabilizar o arco devido a abertura da raiz ser demasiadamente grande, e para seguir a soldagem após a parada do processo, não foi realizado nenhum procedimento de preparação por esmerilhamento conhecido como “unha”, e sim a tocha foi posicionada logo acima do

último ponto contendo material de adição, e o processo foi reiniciado. Desta maneira geraram-se pontos com dificuldade de estabilização do arco, que acontecem em contato com a escória por trás da raiz, gerando nos passes subsequentes uma outra descontinuidade, a porosidade, causada por limpeza inadequada do local. O acúmulo destas descontinuidades causou redução suficientemente grande para fragilizar a região da solda. O exposto acima pode ser observado nas Figuras 35 e 36.



Figura 35: Imagem das descontinuidades da solda.
Fonte: Autor.



Figura 36: Amostra 2P1 seção transversal (Esquerda) e face (direita).
Fonte: Autor.

Para todas as outras amostras, a ruptura ocorreu no material de base, conforme esperado, sempre ocorrendo fora da região entre soldas como demonstrado na Figura 37. Visualiza-se também a fratura com aspecto de material dúctil, apresentando alongamento visível na seção da ruptura.



Figura 37: Amostras condição 1. Face (esquerda) e transversal (direita).
Fonte: Autor.

4.5.3 Amostras grupo 2

Assim como as amostras do grupo 1, foram ensaiadas 2 amostras por CP, totalizando 8 amostras. Os valores obtidos nos ensaios estão dispostos na Figura 38 e na Tabela 15.

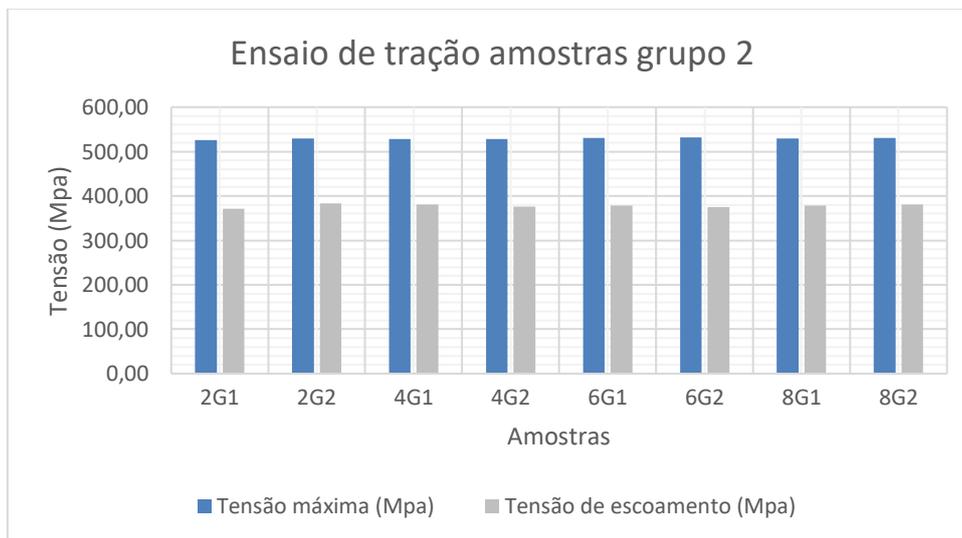


Figura 38: Ensaio de tração amostras grupo 2.
Fonte: Autor.

Tabela 15: resistência a tração amostras grupo 2.

Identificação amostra	Tensão máxima (Mpa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Alongamento na ruptura (%)
2G1	526,15	371,63	35,31
2G2	529,15	383,56	33,38
4G1	528,10	380,96	34,87
4G2	528,76	376,16	33,54
6G1	530,28	378,73	31,53
6G2	531,26	374,74	34,39
8G1	529,75	379,07	34,72
8G2	530,06	381,23	32,92
Média	529,19	378,26	33,83
Des. Padrão	1,46	3,64	1,16

Fonte: Autor.

As amostras do segundo grupo apresentaram valores com menor dispersão dos resultados. Assim como o grupo 1, todas as amostras tiveram a fratura fora da seção entre as soldagens, porém, neste grupo pôde-se perceber um alongamento na seção central, como pode ser observado na Figura 39.

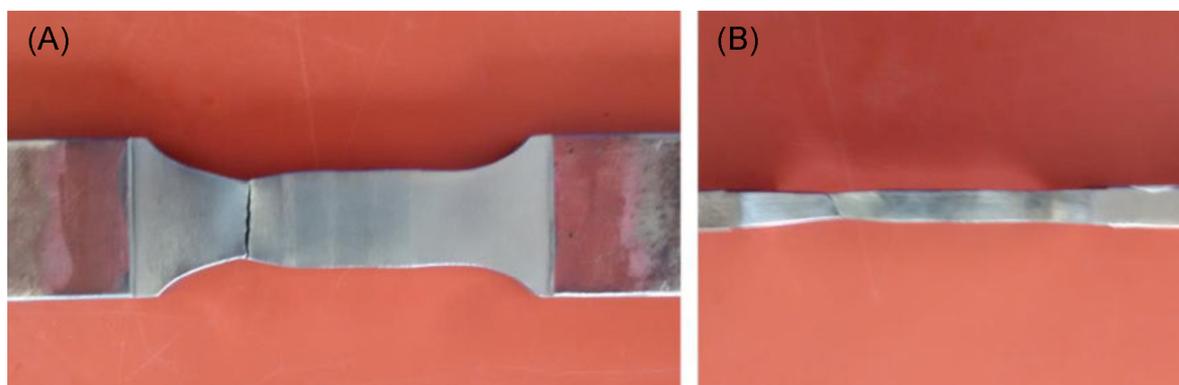


Figura 39: AMOSTRA GRUPO 2. (A) VISTA SUPERIOR, (B) VISTA LAERAL.

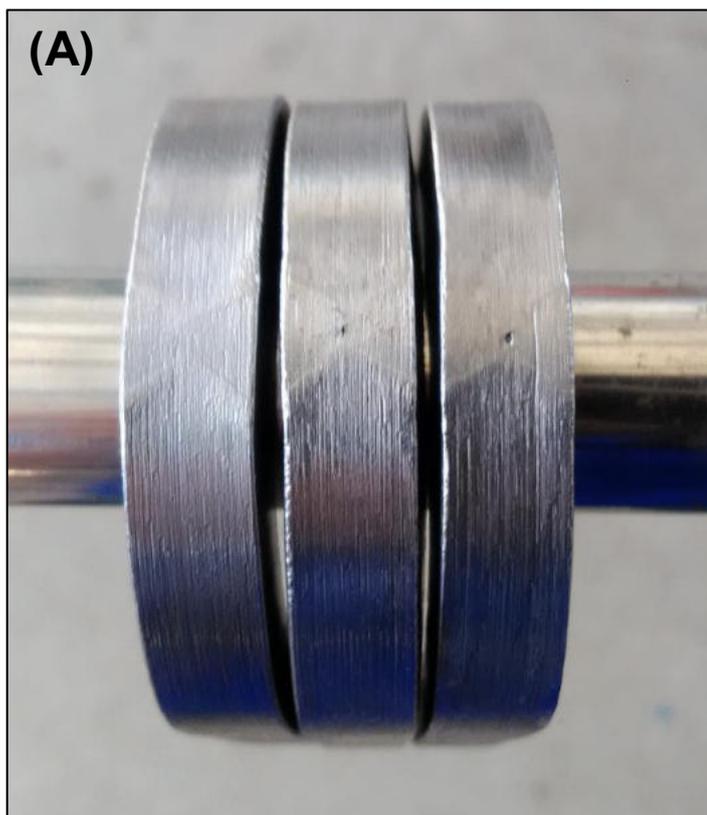
Fonte: Autor

4.6 ENSAIOS DE DOBRAMENTO LATERAL

O ensaio de dobramento lateral tem por objetivo verificar a integridade da solda quando esta é submetida a pressão de um punção, para analisar se a junta soldada possui a resistência necessária para que não surjam descontinuidades. Como exposto acima, este ensaio é idealizado para uma única junta soldada, sendo

necessário adaptar o ensaio para o caso em estudo. Como as juntas possuem uma pequena distância entre si, considerou-se aplicar a carga no centro dos cordões, concentrando a carga e a deformação mais drástica na região onde este estudo tem por objetivo avaliar.

Os resultados dos corpos de prova de referência com uma única junta soldada se mostraram satisfatórios, mesmo contendo uma pequena falta de fusão apresentada nas três amostras. Estas não sofreram nenhuma ação que resultasse na propagação das descontinuidades, conforme demonstrado na Figura 40 (A). A seguir estão expostas uma amostra de cada CP para os grupos 1 e 2 conforme Figura 40 (B) e (C), respectivamente.



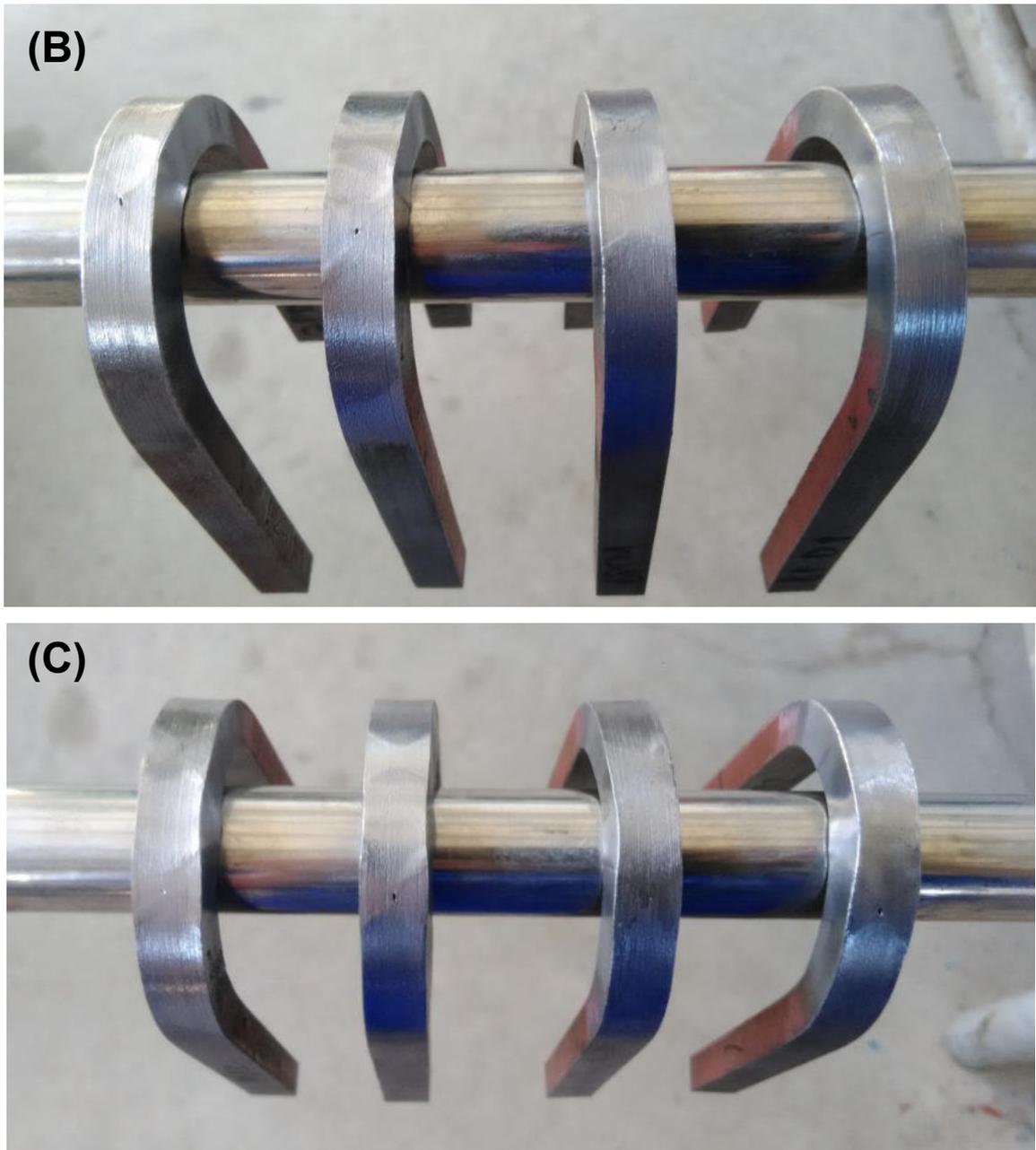


Figura 40: Amostras de dobramento. (A) Referências, (B) Grupo 1 e (C) Grupo 2.
Fonte: Autor

Assim como ocorrido na amostra 2PT1 de ensaio de tração, a única amostra que não atendeu as especificações descritas nas referências normativas para o ensaio de dobramento foi a amostra 2PD1, que é proveniente da mesma seção da amostra de tração. Como pode ser observado na Figura 41, esta amostra apresentou dois pontos de propagação das descontinuidades para a segunda junta. Também é possível observar a falta de fusão ocorrida na primeira junta. Este fato se observa em função do deslocamento causado pelo primeiro cordão de solda, que tende a deslocar

a seção intermediária adicionada, tornando difícil a penetração total quando é realizada a soldagem por trás da primeira junta.

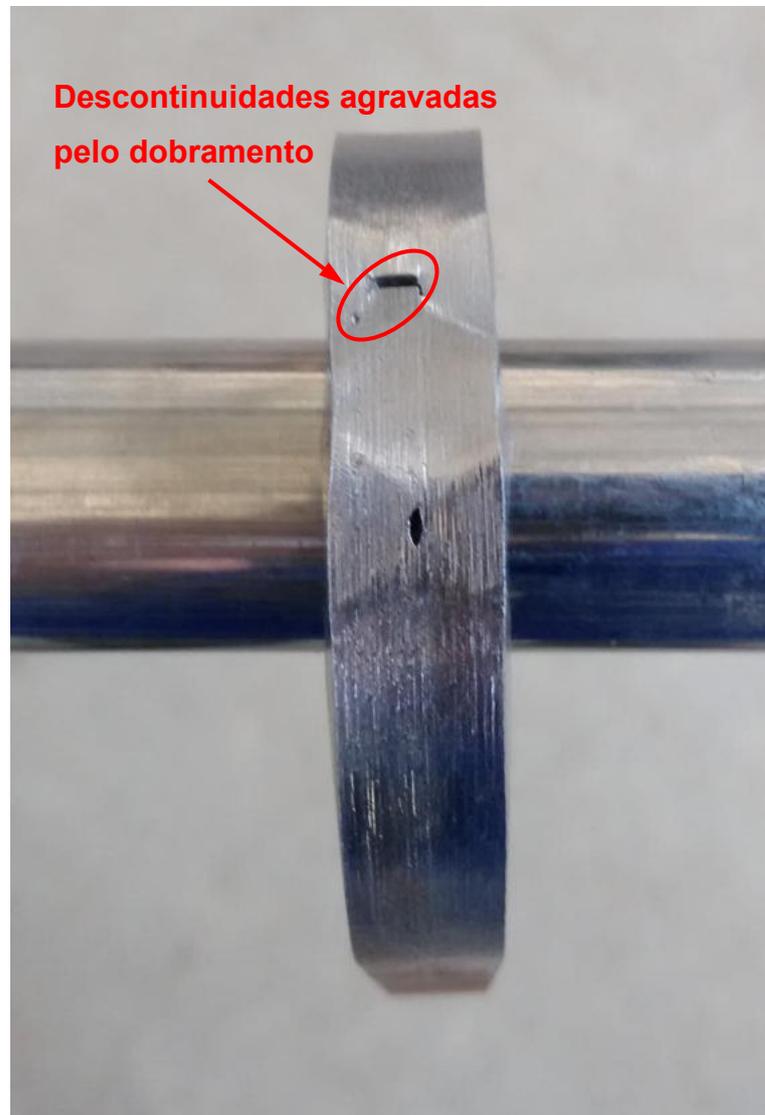


Figura 41: Ensaio de dobramento amostra 2PD1.
Fonte: Autor

4.7 MICRODUREZA

Os ensaios de microdureza tem por finalidade verificar a variação resultante dos efeitos sofridos pela condição imposta ao material. No presente trabalho indica as variações de dureza microestrutural causadas pelos fenômenos de soldagem, causando modificações na estrutura do material.

Assim, utilizou-se o perfil de microdureza gerado pela amostra de referência para comparar as possíveis variações da mesma quando os ensaios foram realizados para os grupos 1 e 2. A Figura 42 indica os locais de indentação realizados na amostra de referência, e a Figura 43 indica os valores obtidos, na forma gráfica. Nota-se que a variação de dureza acontece na zona afetada pelo calor (ZAC), e que as regiões de solda e material mantém relativa constância de valores.

Os valores máximos de dureza são obtidos na região caracterizada pela transformação da matriz (metal de base ferrita + perlita) em uma única fase composta pela interação destes, conhecida como bainita, que gera grãos finos e lamelares conforme item 4.4.3, incrementando consideravelmente a dureza em uma pequena seção próxima a linha de fusão.

Também se percebe que este fato está associado unicamente aos perfis gerados próximos as faces superior e inferior, não existindo esta tendência na região central da amostra. Fator este determinado pela quantidade de energia imposta a cada região, visto que a região central todo efeito térmico causado pelo primeiro passe (raíz) sofreu nova influência por outro passe subsequente, como por exemplo a soldagem por trás da raiz e o passe de acabamento, assim, atuando como tratamento térmicos e favorecendo a redistribuição da fase, o que contribui para aumentar a tenacidade e conseqüentemente reduzir a dureza localizada. Como avaliado no estudo da sobreposição de passes por Aloraier (2006).

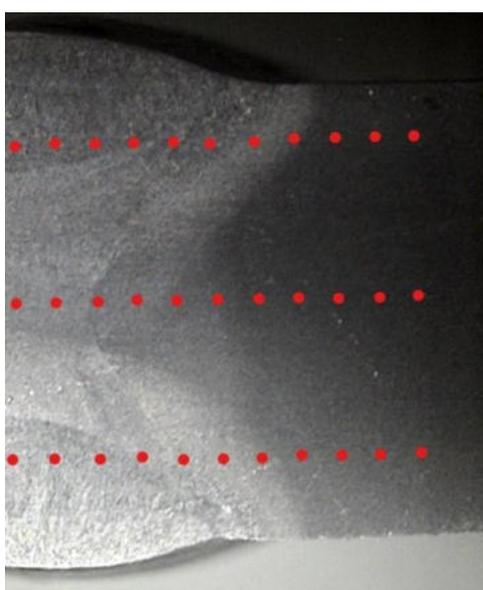


Figura 42: Localização das indentações realizadas na amostra de referência.

Fonte: Autor

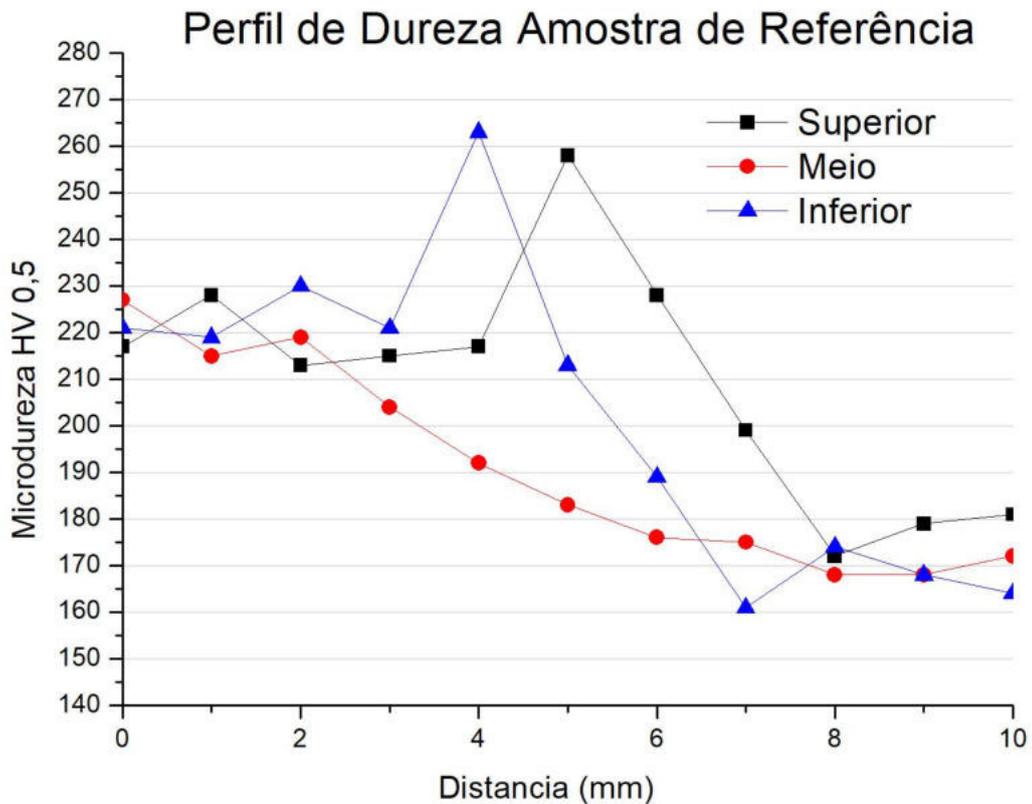


Figura 43: Perfil de dureza gerado da amostra de referência.

Fonte: Autor

Como se pode perceber na amostra de referência, as regiões mais impactadas pela alteração da dureza foram as regiões superiores e inferiores, sendo este o principal motivo para a realização dos chanfros em X para os grupos estudados, possibilitando a avaliação nas duas faces da chapa. Abaixo nas Figuras 44 e 45 é possível observar os perfis de dureza gerados respectivamente para a amostra 2P pertencente ao grupo 1 e a amostra 6G representando o segundo grupo.

De uma forma geral todas as amostras apresentaram condições bem similares dentro de seus grupos, apresentando relativa constância nos valores para a região da ZF, sofrendo aumento de dureza na ZTA nas imediações da linha de fusão e posteriormente reduzindo a dureza até os valores do material de base em torno de 175 HV. Conforme detalhamento dos valores médios obtidos para as zonas de fusão e material de base, assim como valores máximos e mínimos presentes na ZAC para cada grupo presentes na Tabela 16.

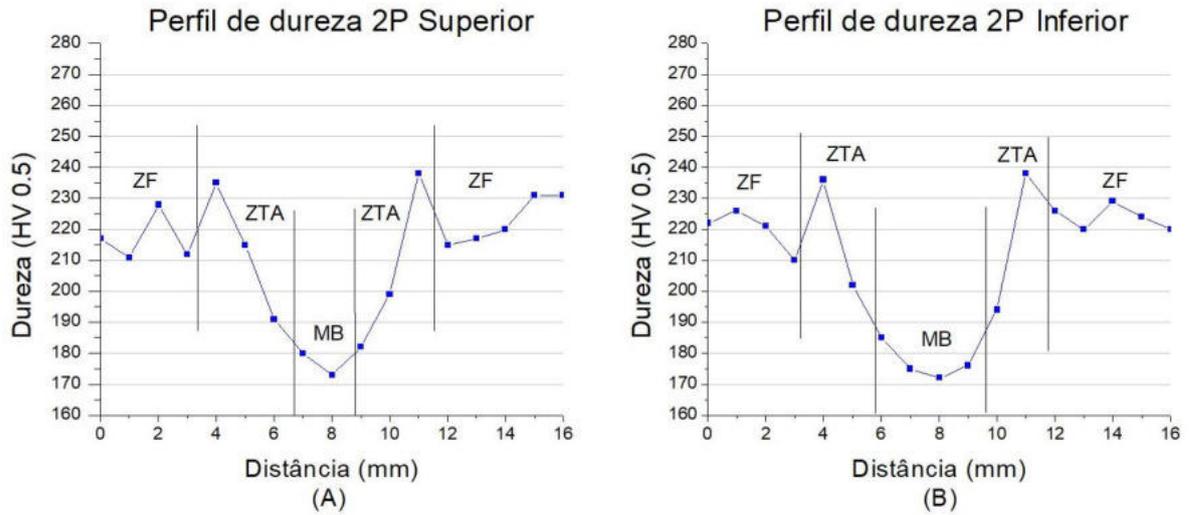


Figura 44: Perfis de dureza 2P indicando as regiões.
 (a) Face superior (B) Face inferior
 Fonte: Autor

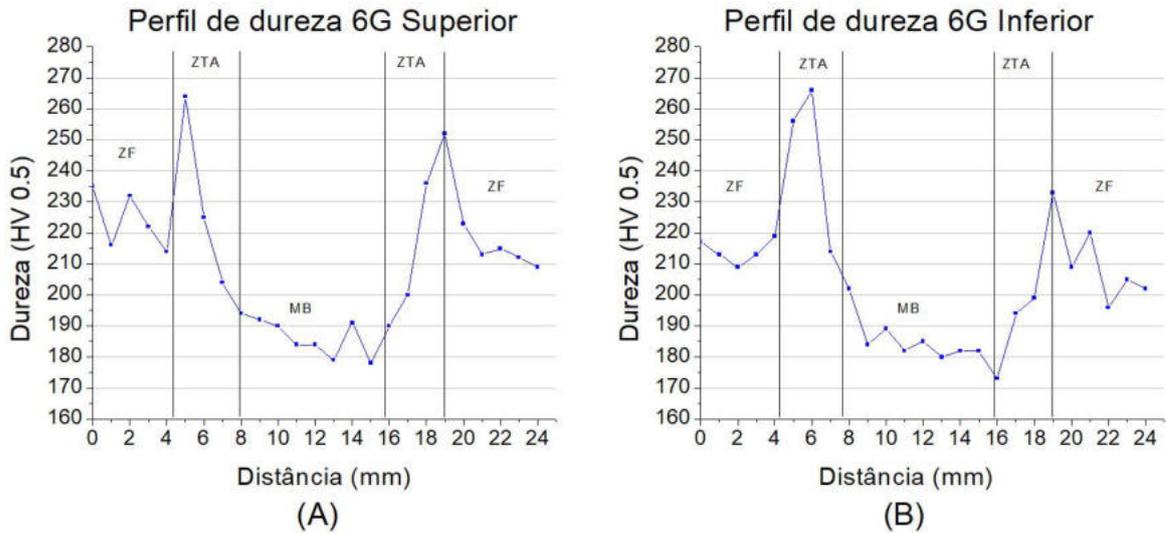


Figura 45: Perfis de dureza 6G indicando as regiões.
 (a) Face superior (B) Face inferior
 Fonte: Autor

Tabela 16: Dados encontrados para dureza.

Amostras	Média de Dureza		Desvio Padrão		Dureza ZTA	
	ZF	MB	σ (ZF)	σ (MB)	Máxima	Mínima
Referência	220,11	171,29	5,36	6,88	258	189
Grupo 1	213,93	176,13	9,99	5,46	258	179
Grupo 2	216,62	179,71	8,35	6,29	266	182

Fonte: Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente verificando-se apenas os aspectos metalúrgicos das amostras realizadas, foi constatado que as amostras de referência quando comparadas às dos grupos 1 e 2, não obtiveram variações significativas considerando-se o tamanho da zona termicamente afetada (ZTA). Acredita-se que este fato se deu em função da energia de soldagem aplicada ser praticamente a mesma para os casos onde realizadas 2 juntas. Além disso, estas não apresentaram interação suficiente para transformação térmica. Ainda avaliando os microconstituintes, nota-se a presença de uma estrutura com granulação refinada localizada na ZTA próximas da linha de fusão, o que confere a junta locais onde a dureza pode apresentar acréscimo de até 10%. A microestrutura obtida está de acordo com o esperado, tanto para as amostras de referência quanto para as amostras dos grupos 1 e 2, indicando que mesmo realizando soldagens a distâncias de 13 mm, não ocorre modificação metalúrgica significativa.

Os fatores avaliados pelos ensaios de tração demonstraram que as tensões se mantiveram constantes e acima dos limites definidos por norma, tanto para os ensaios com uma única junta como para as duas condições propostas, havendo pequeno acréscimo de resistência quando comparados aos ensaios realizados no material sem solda. O total 17 entre as 18 amostras tiveram ruptura no material de base situado entre o raio de concordância e o metal de adição.

Para a condição de dobramento, novamente 17 entre as 18 amostras mantiveram-se dentro dos padrões estabelecidos nos critérios de aceitação. Mesmo existindo descontinuidades como falta de fusão e inclusões de escória, as juntas demonstraram a inexistência de mecanismos propagadores de trincas e outros defeitos provenientes dos processos de soldagem.

Ao longo do trabalho pôde-se acompanhar uma série de condições inesperadas de falhas, como a dificuldade de estabilização de parâmetros para realização da soldagem do passe de raiz, com equipamento de deslocamento não oscilante. Contudo foi possível gerar uma grande quantidade de dados necessitam de mais estudos de modo a evitar desperdício de material na indústria, mantendo-se a integridade total das uniões soldadas.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo investigar as limitações sugeridas pela IACS-47, sendo esta uma referência adotada pelas sociedades classificadoras responsáveis pela aprovação dos projetos de estruturas navais, bem como o acompanhamento da execução das disposições por ela determinada quanto a restrições de aplicação. Para isso, sujeitou-se chapas de aço estrutural a condições extremas, visando investigar os possíveis pontos restritivos a sua aplicação.

A principal motivação deste trabalho é contribuir ao entendimento das restrições que as normas impõem, sem levar em consideração fatores específicos de cada processo de soldagem a arco que tendem a alterar consideravelmente os aspectos das uniões soldadas.

A partir do estudo realizado, conclui-se que foi possível soldar chapas com pequenas seções entre elas, de 13 e 20 mm de distância, adequando os parâmetros de soldagem à condição exposta. Ainda, avaliando a microestrutura obtida após as soldas, conclui-se que não houve modificação metalúrgica significativa, quando soldadas pequenas seções entre chapas.

Avaliando a resposta mecânica, observou-se que todos os resultados obtidos apresentaram valores dentro das exigências da norma. Observou-se algumas descontinuidades que, no entanto, não afetaram o desempenho das chapas.

Verificando-se todos os resultados obtidos, percebe-se que houve pouca ou nenhuma modificação estrutural quando soldadas chapas com seções de até 13 mm entre elas, indicando que não há justificativa para a utilização de seções maiores, conforme especificado por norma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de tração. Rio de Janeiro, 2013.

ALORAIER, Abdul; IBRAHIM, Raafat; THOMSON, Peter. **FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 83, n. 5, p. 394-398, 2006.

ASME- American Society of Mechanical Engineers. **IX, ASME Sec. Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators**. 2013.

ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM A131 / A131M – 14, Standard Specification for Structural Steel for Ships**. In: Anual Book of ASTM, 2014.

ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM A 370 – 17a, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. In: Anual Book of ASTM, 2017.

ASTM – American Society for Testing Materials. ASTM E 384 – 17, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. In: Anual Book of ASTM, 2017.

ASTM Standards, vol 03.01.[s/n]: West Conshohocken: USA, 2004.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook. Test Methods for Evaluation Welded Joints**. USA: [s.n.]. 2010.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A 5.20/5.20M. Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding**. USA: [s.n.]. 2005.

BARBEDO, Nancy Del Ducca. **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW E FCAW UTILIZANDO AÇO ASTM A-36 PARA VERIFICAR A SOLDABILIDADE, PROPRIEDADES METALÚRGICAS E GEOMÉTRICAS, E RESISTÊNCIA MECÂNICA**. 2011. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ.

BATISTA GUIMARÃES, Pablo. **Estudo de campo de temperatura obtido numericamente para posterior determinação das tensões residuais numa junta soldada de aço ASTM AH36**. 2010.

CASTRO, Eliana Christina de Jesus. **AVALIAÇÃO DE SOLDAS PRODUZIDAS POR ARAMES TUBULARES DESENVOLVIDOS EM LABORATÓRIO DO TIPO BÁSICO COM ADIÇÃO DE POLÍMERO COMO INGREDIENTE DO FLUXO**. 2015. Dissertação de Mestrado. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS.

Catálogo: Hyunday Welding: SF-71 FLUX CORED ARC WELDING CONSUMABLE

FOR WELDING OF MILD & 490MPa CLASS HIGH TENSILE STEEL. Rev. 01.

COTA, André Barros et al. **Influência da temperatura de austenitização sobre a cinética de formação da ferrita em um aço microligado com Nb.** Rem: Revista Escola de Minas, v. 55, n. 4, p. 273-277, 2002.

DA SILVA, Eduardo Miguel. **Comparação de Características Operacionais no Processo com Eletrodo Tubular utilizando as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado na Posição Vertical Descendente.** 2006. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ.

DA SILVA, Marcos Saalfeld. **Comparação da vida em fadiga de juntas soldadas pelos processos com proteção gasosa (gas metal arc welding - gmaw) e arame tubular (flux cored arc welding - fcaw) num aço estrutural microligado.** 2018. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG.

DE MELO, Leonardo Gadelha Tumajan Costa; CARDOSO, Francisco Ilo Bezerra; FERREIRA, Ricardo Artur Sanguinetti. **Previsão das Dimensões da Zona Termicamente Afetada de Juntas Soldadas com Variação de Parâmetros de Soldagem.** Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 3, n. 1, 2016.

FENG, Ke et al. **Numerical prediction of non-equilibrium solidification path in mushy zone of steel AH36.** Liangang(Steelmaking), v. 23, n. 3, p. 50-53, 2007.

FORTES, C. Apostila Arames Tubulares. ESAB BR, Maio, 2004.

GHAZVINLOO, H. R.; RAOUF, A. Honarbakhsh. **Effect of Gas-Shielded flux cored arc welding parameters on weld width and tensile properties of weld metal in a low carbon steel.** Journal of Applied Sciences, v. 10, n. 8, p. 658-663, 2010.

GOMES, Enedina Beatriz. **Análise do comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi.** 2006. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá.

GORNI, Antonio Augusto. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas.** Corte e Conformação de Metais, v. 4, n. 44, p. 26-57, 2008.

JÚNIOR, Diniz Ramos de Lima. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW e SMAW.** 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

MACIEL, Lucas Fernando Chagas. **Efeitos da vibração simultânea nas propriedades mecânicas de juntas de aço ASTM A131 soldadas pelo processo arame tubular (FCAW).** 2014.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José. **Algumas equações úteis em soldagem.** Soldagem e Inspeção, Brasil, v. 19, n. 1, p. 91-102, 2014.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**. UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.

MOREIRA, Alcindo Fernando. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. 2008.

NO, **IACS Recommendation. 47"** Shipbuilding and Repair quality standard. Rev3, Nov, 2006.

ORDÓÑEZ, Robert Eduardo Cooper. **Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aço API 5L-X80 com diferentes arames tubulares**. Universidade Estadual de Campinas-Faculdade de Engenharia Mecânica, 2004.

OSORIO, Alice Gonçalves et al. **Study of chemical element transfer from flux to weld metal in submerged arc welding**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 21, n. 2, p. 510-524, 2016.

PERINI, Felipe Gustavo. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. 2014.

RIBEIRO, Anderson Clayton Nascimento. **Avaliação da soldagem do aço naval AH36 microligado soldado pelo processo arco submerso com um e dois arames**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RODRIGUES, Lino Alberto Soares. **Caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas de soldas do aço ASTM A 131 pelos processos FCAW convencional e com adição de arame frio**. 2011.

STARLING, Cícero Murta Diniz; MODENESI, Paulo José; BORBA, Tadeu Messias Donizete. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular" Metal Cored**. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 16, p. 285-300, 2011.

STARLING, Cícero Murta Diniz; MODENESI, Paulo José; BORBA, Tadeu Messias Donizete. **Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares**. *Revista Soldagem & Inspeção*, v. 14, n. 1, p. 010-025, 2009.

YILMAZ, Ramazan; TÜMER, Mustafa. **Microstructural studies and impact toughness of dissimilar weldments between AISI 316 L and AH36 steels by FCAW**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 67, n. 5-8, p. 1433-1447, 2013.

ZACZEK, Z.; CWIEK, J. **Prediction of HAZ hardness in welds of quenched and tempered HSLA steels**. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, v. 72, p. 37-s, 1993.

ZHANG, Yong et al. **Heat input and metal transfer influences on the weld geometry and microstructure during underwater wet FCAW**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 238, p. 373-382, 2016.

ZHAO, Ming-Chun; YANG, Ke; SHAN, Yiyong. **The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel.** Materials Science and Engineering: A, v. 335, n. 1, p. 14-20, 2002.