

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO – Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

**INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DOS ELETRODOS NA
MICROESTRUTURA DE SOLDAS EM AÇO ARBL HARDOX 450**

Paola Conte
166574@upf.br

Professor Dr. William Haupt
william.haupt@upf.br

Comissão Examinadora – Prof. Dr. Luiz Airton Consalter, Prof. Esp. Volmir Supptitz

RESUMO

Existem possíveis causas de falhas que influenciam diretamente na qualidade e vida útil do material na soldagem que precisam ser levadas em conta em uma análise desenvolvida como: conhecer as principais características do metal e do processo a ser utilizado, consumíveis para soldagem entre outros fatores. Sendo assim, entender como o processo de soldagem influencia na caracterização da microestrutura é fundamental. Esse tipo de processo é muito utilizado em empresas de engenharia e tecnologia. O presente trabalho propõe o estudo do processo de soldagem GMAW (MIG/MAG) automatizado aplicado ao material aço de alta resistência e baixa liga Hardox 450. Para isso, foi efetuado a soldagem no aço Hardox 450 com diferentes arames de deposição, analisado a influência da composição dos eletrodos na microestrutura do material, para determinar quais influências geram na microestrutura e microdureza do metal. Com a análise laboratorial de metalografia e microdureza que forneceram os dados para conclusões deste trabalho, possibilitou ver que o melhor resultado ocorreu com o metal de adição ER90S-D2, onde a microestrutura teve uma granulação mais refinada e a dureza se manteve mais elevada ao longo da junta soldada.

Palavras-chave: Aço de alta resistência e baixa liga Hardox 450; Soldagem GMAW automatizado; Metalografia; Comportamento da microestrutura; Eletrodos.

1 INTRODUÇÃO

Com os requisitos cada vez mais elevados de qualidade para os produtos industriais, torna-se extremamente necessário estudar e analisar novas possibilidades de alterações de propriedades que levam a melhora de desempenho dos produtos desenvolvidos. Aços estruturais de alta resistência e baixa liga (ARBL) vem tendo um grande foco nos dias atuais pois tem melhores propriedades em relação aos aços-carbonos, tendo uma grande aplicabilidade na construção civil e indústria mecânica, pois consegue-se uma redução de peso, aumento de carga e ganho de vida útil. Além disso esses aços apresentam boa soldabilidade, fator importante para desenvolvimento de produtos (VEIGAS, 2016).

Os aços ARBL possuem um baixo teor de carbono e contém adições pequenas de elementos de liga que aumentam gradativamente sua resistência mecânica (CRUZ, 2006).

Com a adição dos elementos de liga, pode-se aumentar algumas propriedades como: resistência mecânica, oxidação, corrosão, resistência ao impacto, limite de elasticidade, refinar

granulação, limite de escoamento e qualidade superficial.

Partindo desta ideia, o presente trabalho a ser realizado pretende analisar alguns parâmetros, sendo eles diretamente ligados a caracterização da microestrutura e microdureza, após ser efetuado o processo de soldagem GMAW automatizado utilizando diferentes arames de deposição.

O Hardox 450, possuiu como característica a sua elevada dureza, o que atribuiu para este material uma alta resistência e vida útil, sendo necessário avaliar após o processo de soldagem a sua dureza nas regiões do metal base, zona afetada pelo calor e metal de adição.

Através da caracterização macroestrutural, microestrutural e da microdureza em diferentes regiões alteradas pelo aquecimento fornecido pela soldagem, foi executada a identificação das microestruturas formadas após desenvolver o processo. Buscou-se identificar em relação a dureza e a formação de grãos, alterações consideráveis na microestrutura e no comportamento das zonas afetadas pelo calor. Esses fatores são de grande importância que impactam na diminuição da dureza, resistência mecânica e na vida útil do metal soldado.

1.1 Objetivos Gerais e Específicos

Verificar a influência da composição dos eletrodos no processo de soldagem GMAW automatizado em aço ARBL, tendo em vista à análise de caracterização da macroestrutura, microestrutura e microdureza da junta soldada.

- Análise de macrografia, para verificação de presença de defeitos macro (porosidades, trincas, inclusões macro, entre outros).
- Análise de micrografia, verificar a microestrutura do material após o processo.
- Análise de microdureza, efetuada por endentações estáticas provocadas por cargas controladas e com possível avaliação.
- Com a análise dos parâmetros executadas, definir qual a caracterização microestrutural do material aço liga Hardox 450 nas regiões afetadas, após realizado o processo de soldagem automatizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados uma revisão sobre os conceitos de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), como sua microestrutura, propriedades mecânicas, resistência, composição química, soldagem robotizada GMAW (MIG/MAG) e diferentes composições dos eletrodos entre ER70S-6 e ER90S-D2, que serão usados para analisar a caracterização da microestrutura e microdureza do aço Hardox 450, após o processo de soldagem.

2.1 Aços de alta resistência e baixa liga

São aços que se aplicam em estruturas fixas como edifícios ou pontes, estruturas móveis no setor de transporte onde o maior interesse se concentra na redução do peso próprio da estrutura. São um tipo de aço liga que proporciona melhores propriedades mecânicas, ou maior resistência a corrosão do que o aço carbono, a resistência a corrosão só é alcançada com a adição de pequenos teores de cobre na ordem de 0.25%, o manganês fortalece a ferrita aumentando a

resistência mecânica o Mn acima de 1% por si só melhora a resistência, silício aumenta a resistência mecânica e a resistência a oxidação. Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL ou HSLA – High-Strength, Low-Alloy) são definidos da seguinte forma: são aços específicos com composição química especialmente desenvolvida para proporcionar mais altos valores de propriedades mecânicas e em alguns casos melhor resistência à corrosão. Os principais elementos de liga adicionados a este tipo de aço são: Mn, Nb, V, Ti, Co, Al, Cu e Cr.

Sua composição química esta dentro desta faixa apresentada na Tabela 1:

Elementos de liga em um aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)		
Elemento	Percentual (%)	Efeito nas propriedades
Silício	Até 0,90	Aumenta resistência mecânica e a resistência oxidação
Manganês	Até 1,60	Melhora a resistência mecânica
CU	Até 1,25	Melhora a resistência a corrosão
Cobre	Até 1,80	Aumenta a resistência, limite de elasticidade, tenacidade, resistência ao impacto e corrosão
Níquel	Até 5,25	Melhora as propriedades mecânicas, resistência a corrosão e refina a granulação
Molibdênio	Até 0,65	Aumenta resistência mecânica
Zircônio	Até 0,12	Garantir a granulação fina e desoxidação
Alumínio	Até 0,20	Desoxidar e refinar grão
Enxofre	Até 0,30	Melhora as propriedades mecânicas
Titânio	Até 0,05	Redução de grão e desoxidante
Boro	Até 0,005	Aumenta as propriedades mecânicas

Tabela 1 – Elementos de liga no aço ARBL e seus efeitos nas propriedades do aço.

Fonte: CALLISTER, William D. Jr., 1940 (2020)

Atualmente eles merecem uma maior atenção pois antes do desenvolvimento dos mesmos a resistência era obtida através da adição de carbono e manganês, resultando em baixa soldabilidade e tenacidade. Com os aços ARBL através de pequenas adições de elementos de liga, são obtidas boas tensões de escoamento, com baixo teor de carbono, o que resulta em uma boa soldabilidade comparando-se com aços convencionais.

A principal vantagem dos aços ARBL com sua alta resistência mecânica e boas tensões de escoamento acima de 276MPa, pode ser levado em conta que sua espessura pode ser reduzida, diminuindo o peso do projeto desenvolvido e o custo final do mesmo (OSÉIAS, 2015 pg 14).

Segue as tabelas 2 e 3, identificando algumas comparações entre os aços carbono e aço ARBL.

Designação		Composição (%)		
Número AISI/SAE ou ASTM	Número UNS	C	Mn	Outros
Aços-carbono comuns com baixo teor de carbono				
1010	G10100	0,10%	0,45%	
1020	G10200	0,20%	0,45%	
A36	K02600	0,29%	1,00%	0,2% Cu
A516 classe 70	K02700	0,31%	1,00%	0,25% Si
Aços de alta resistência e baixa liga				
A440	K12810	0,28%	1,35%	0,3% Si (máx) 0,20% Cu (mín)
A633 classe E	K12002	0,22%	1,35%	0,30% Si, 0,008% V, 0,02% N, 0,03%Nb
A656 classe 1	K11804	0,18%	1,60%	0,6% Si, 0,1% V, 0,20% Al, 0,015 N

Tabela 2 – composição de cinco aços-carbono comuns com baixo teor de carbono e de três aços de alta resistência e baixa liga.

Fonte: CALLISTER, William D. Jr., 1940 (2020)

Número AISI/SAE ou ASTM	Limite de resistência a Tração (Mpa (ksi))	Limite de escoamento (Mpa (ksi))	Ductilidade (% Alongamento em 50mm (2 in))	Aplicações típicas
Aços-carbono comuns com baixo teor de carbono				
1010	325 (47)	180 (26)	28	Painéis de automóveis, pregos e arrames
1020	380 (55)	205 (30)	25	Tubos; aço estrutural e em chapas
A36	400 (58)	220 (32)	23	Estrutural (pontes e edificações)
A516 classe 70	485 (70)	260 (38)	21	Vasos de pressão para baixas temperaturas
Aços de alta resistência e baixa liga				
A440	435 (63)	290 (42)	21	Estruturas que são aparafusadas ou rebitadas
A633 classe E	520 (75)	380 (55)	23	Estruturas usadas em temperaturas ambientes baixas
A656 classe 1	655 (95)	552 (80)	15	Chassis de caminhões e vagões de trem

Tabela 3 – características mecânicas de materiais laminados a quente e aplicações típicas para vários aços-carbono comuns com baixo teor de carbono e aços de alta resistência e baixa liga.

Fonte: CALLISTER, William D. Jr., 1940 (2020)

Segundo Anna (2019) uma das microestruturas que pode ser encontrada na literatura para aço ARBL é apresentada na figura 1, em uma matriz mista de grãos ferríticos e perlíticos. São observados dois tipos de ferrita: a ferrita acicular e a poligonal. O grão sem formato denominado é caracterizado como poligonal e o acicular tem a forma de uma placa fina ou ripa.

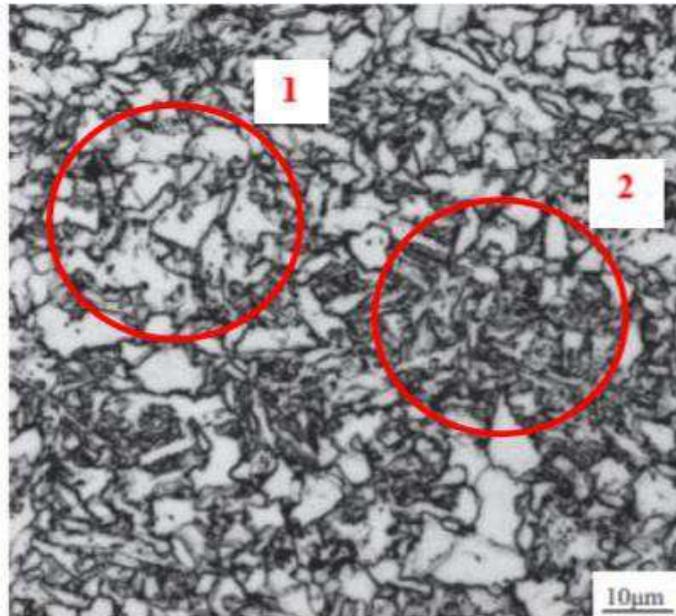


Figura 1 – A imagem apresenta heterogeneidade na morfologia da ferrita, em (1) é apresentado a ferrita poligonal e em (2) a ferrita acicular.

Fonte: MELO, Anna Clara, 2019 (2020)

Os aços perlíticos no estado laminado constituem um grupo específico dos aços em que as propriedades mecânicas são melhoradas pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga, alguns desses aços com um teor maior de manganês se caracterizam por atingir, no estado laminado, limites entre 290 e 3456MPa.

Os aços de ferrita acicular são caracterizados por possuírem uma microestrutura muito fina de ferrita acicular e alta resistência, através da adição de manganês, molibdênio e boro. Os aços ferríticos aciculares podem ser obtidos por têmpera ou resfriamento ao ar. Esses aços apresentam um limite de escoamento entre 415 a 690MPa.

Os aços ARBL são usados quando se deseja aumentar resistência mecânica para que seja possível diminuir uma estrutura de forma considerável mantendo a mesma resistência, melhorar a resistência a corrosão para que quando as seções forem diminuídas mantenha a vida útil da estrutura, elevar o limite de escoamento e o limite de resistência a tração.

Segundo Djeison (2012) as características, principalmente de elevada resistência mecânica é obtida através de um processo de laminação a quente controlada, tendo sua microestrutura microligada com nióbio, vanádio e titânio, que visa o controle da microestrutura e a obtenção de propriedades adequadas a aplicação final. Ligas com nióbio fornecem um refinamento de grão e endurecimento por precipitação.

2.2 Aço Hardox 450

Este material apresenta uma combinação consistente entre elevada resistência mecânica, excelente resistência ao impacto e alta dureza. O valor médio da tensão de escoamento fica entre 1254 MPa e a resistência à tração 1463 MPa e alongamento de 4,84%.

Segundo Daniel (2016) a elevada dureza ao desgaste das chapas de aço Hardox aumentam a vida útil dos seus produtos. Devido à sua resistência mecânica, os projetos fabricados com Hardox podem ser produzidos de forma mais simples se tornando mais leves, mantendo a

mesma capacidade de suportar altas cargas. Além disso, o aço Hardox apresenta boa resistência ao impacto em baixas temperaturas. O mesmo tem uma boa usinabilidade e soldabilidade que simplificam o processo de fabricação e de reparo do produto.

A composição química especificada do Hardox é definida em termos de composição máxima de cada elemento de liga que é apresentado na tabela 4.

ELEMENTO QUÍMICO	C max %	Si max %	Mn max %	P max %	S max %	Cr max %	Ni max %	Mo max %	B max %
%	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,5	0,60	0,005

Tabela 4 – Composição química especificada do Hardox 450.

Fonte: VIEGAS, Daniel, 2016 (2020)

Buscando a melhoria de desempenho de um aço quanto a soldabilidade, novos projetos de liga veem sendo desenvolvidos tendo em vista à redução do carbono equivalente, porém, sem alterações das suas propriedades mecânicas. Sendo assim, este aço apresenta um carbono equivalente de no máximo 0.46% a 0.52%, quando calculado pela fórmula:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

- Onde:
- CE: carbono equivalente
 - Ni: percentual de níquel
 - Mo: percentual de molibdênio
 - Cr: percentual de cromo
 - Cu: percentual de cobre
 - C: percentual de carbono
 - Mn: percentual de manganês
 - V: percentual de vanádio

Segundo Daniel (2016) as chapas de aço Hardox 450 apresentam estrutura martensítica acicular, como na figura 2.

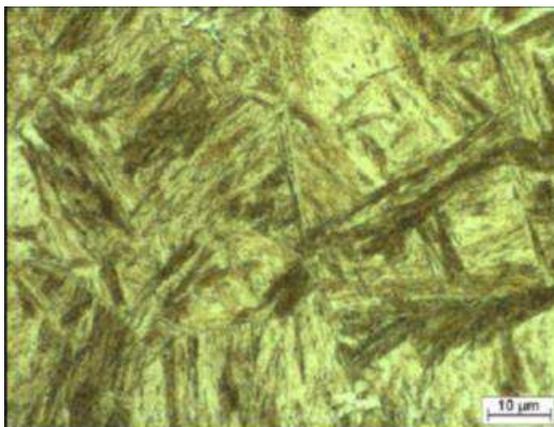


Figura 2 – Microestrutura do aço Hardox 450.

Fonte: VIEGAS, Daniel, 2016 (2020)

2.3 Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa ativa (GMAW)

O processo de soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW – Gas Metal Arc Welding) é onde a união de peças metálicas são produzidas pelo aquecimento das mesmas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível e a peça de trabalho. A proteção da região solda contra contaminação ou impurezas é feita por um gás ou mistura de gases, que são ativos. O processo de soldagem MAG é utilizado nos aços de baixo teor de carbono e aços de baixa liga. Na figura 3, tem-se uma ilustração do processo.

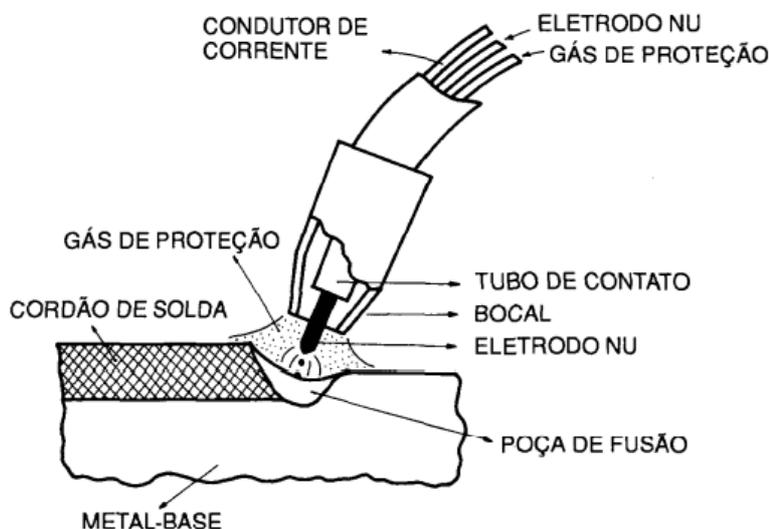


Figura 3 – Processo de soldagem MIG/MAG.

Fonte: WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fábio Décourt Homem, 2004 (2020)

Segundo Nilo (2013) durante o processo de soldagem dos diversos tipos de materiais a temperatura do metal quando soldado atinge valores nos quais transformações microestruturais podem acontecer. O fato de ocorrência desses efeitos de mudanças na microestrutura da junta soldada, afeta em termos de resistência a corrosão e propriedades mecânicas, dependendo o teor de elementos de liga. Apesar destas transformações microestruturais, o principal objetivo da

soldagem é produzir um cordão de solda com qualidade igual ou superior aquela do metal de base.

A soldagem GMAW é um dos processos de união soldada largamente utilizada nas indústrias metal mecânica.

O processo GMAW ocorre por fusão ao arco elétrico. Utiliza um arame consumível continuamente alimentado à poça de fusão e um gás ativo, inerte ou misto para proteção de região de soldagem.

2.4 Características gerais da soldagem GMAW vantagens e limitações

Vantagens do processo:

- Processo semiautomático ou automático, bastante versátil;
- o eletrodo nu é alimentado continuamente;
- a soldagem pode ser efetuada em todas as posições;
- a velocidade da soldagem é bem elevada;
- a taxa de deposição é elevada devido a densidade de corrente alta na ponta do arame;
- não há formação de escória, e com isso não se perde tempo na sua remoção, nem corre risco de inclusão de escória no processo mesmo com vários passes;
- penetração de raiz mais uniforme que no processo com eletrodo revestido;
- problemas de distorção e tensões reduzidas;
- soldagem com visibilidade total da peça;
- fácil controle de penetração e a diluição durante a soldagem;
- facilidade de execução da solda, não necessita de tanta experiência do soldador;
- o soldador pode ser facilmente treinado para soldar em todas as posições.

Limitações:

- tem maior velocidade de resfriamento por não haver escórias, o que isso possibilita a ocorrência de trincas;
- a soldagem deve ser protegida das correntes de ar;
- projeções de gotas de metal líquido durante o processo;
- equipamentos com maior custo e complexo em relação ao eletrodo revestido;
- equipamento com maior dificuldade de descolamento em relação ao de eletrodo revestido.

Na figura 4 segue alguns parâmetros que influenciam a soldagem e os efeitos no processo GMAW.

Parâmetro	Afeta	Efeitos
Intensidade de corrente	<ul style="list-style-type: none"> Quantidade de metal fundido; Profundidade de penetração. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumentando a velocidade de alimentação do eletrodo aumentamos a corrente de solda e a velocidade de deposição; Quanto maior a densidade de corrente maior é a penetração.
Tensão de solda	<ul style="list-style-type: none"> Efeito na diluição. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumentada à tensão do arco, aumenta-se a largura do cordão, para soldas em juntas sobrepostas ou juntas de topo com bordas aparadas retas e sem afastamento. Elevando a tensão podemos diminuir a penetração para juntas com pequenos chanfros.
Velocidade de soldagem	<ul style="list-style-type: none"> Profundidade de penetração; Largura do cordão. 	<ul style="list-style-type: none"> Velocidades elevadas reduzem a penetração e a largura do cordão, aumentando a probabilidade de ocorrência de porosidade; Em velocidades de soldagem elevadas devem-se usar tensões baixas, caso contrário, poderão ocorrer desvios do arco elétrico.
<i>Stick out</i>	<ul style="list-style-type: none"> Taxa de fusão. Estabilidade do arco. 	<ul style="list-style-type: none"> Quanto maior a extensão do eletrodo, maior a taxa de fusão, porém, menor será a estabilidade do arco elétrico, originando falhas e cordões irregulares.

Figura 4 – Parâmetros e efeitos no processo GMAW.

Fonte: MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz, 2001 (2020)

Os gases utilizados na soldagem podem ser inertes ou ativos, ou a mistura destes. O tipo de gás influencia as características do arco e a transferência de metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda, a velocidade máxima de soldagem, a tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo da operação.

Na figura 5 mostra a seção transversal típica de cordões de solda feitos com diferentes gases e misturas.

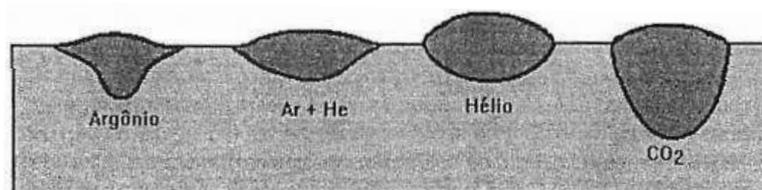


Figura 5 – Perfil típico de cordões de solda feitos com gases e misturas diferentes.

Fonte: MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz, 2001 (2020)

A alteração de geometria do cordão de solda age como concentradores de tensões, facilitando a ocorrência de trincas. Esta ocorrência está ligada a problemas operacionais, como instabilidade do processo e utilização de parâmetros incorretos, a figura 6 ilustra alguns tipos de perfis não aceitáveis na solda.

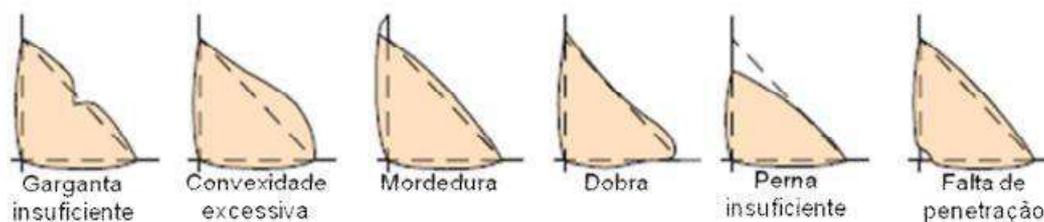


Figura 6 – Perfis não aceitáveis na solda.

Fonte: Fonte: MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz, 2001 (2020)

2.5 Consumíveis

Os principais consumíveis utilizados na soldagem MAG são os arames eletrodo, gás de proteção e quase sempre um líquido para proteção de tocha e regiões da solda contra respingos. Os arames para soldagem são compostos de metais e ligas metálicas, que possuem características controladas.

Os arames de aço são normalmente cobreados. Possuem uma cobertura de cobre que protege o arame de corrosão e possui menor resistividade elétrica. Resultados experimentais mostram que não há diferença entre arame cobreado e não cobreado, entretanto, quando não é usado arame cobreado percebe-se que o desgaste do bico de contato é bem maior.

A tabela 5 relaciona as especificações AWS de arames para soldagem MIG/MAG de diferentes materiais.

Especificação	Consumível
AWS A 5.7	Arames de cobre e suas ligas
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável
AWS A 5.10	Arames de alumínio e suas ligas
AWS A 5.14	Arames de níquel e suas ligas
AWS A 5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.16	Arames de titânio e suas ligas
AWS A 5.18	Arames e arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.19	Arames de magnésio e suas ligas
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A 5.24	Arames para a soldagem de zircônio
AWS A 5.28	Arames de aços de baixa liga

Tabela 5 – Especificações ASW de arames para soldagem MIG/MAG.

Fonte: MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz, 2001 (2020)

Os eletrodos ASW 5.28 são arames de alta resistência e baixa liga. A escolha do arame ideal a ser utilizado no processo como material de adição na junta soldada é executada levando em conta os fatores que influenciam na decisão sobre o tipo específico como, composição química do metal base, gás de proteção, modo de transferência, posição da soldagem, entre outros fatores. A tabela abaixo indica a classificação dos arames para soldagem de aços pelas especificações ASW 5.18 no seguinte formato:

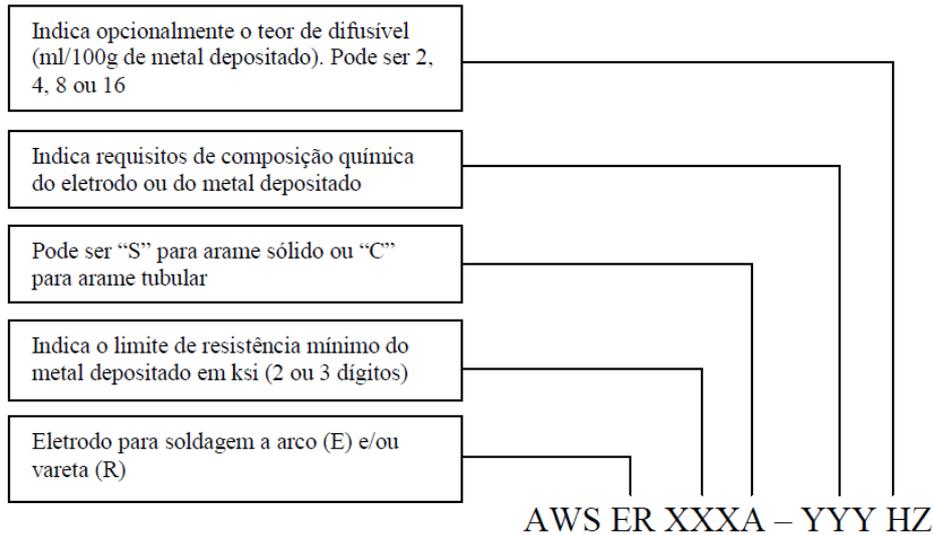


Tabela 6: Classificação dos arames de soldagem de aço pelas especificações ASW.

Fonte: SCHEIDMANDEL, Nilo Alberto, 2013 (2021)

Nas tabelas 7 e 8 são apresentados a resistência mecânica e a composição química dos arames de solda ASW ER70S-6 e ASW ER90S-D2.

Classificação	Composições Químicas Típicas (%)		
	C	Mn	Si
ER70S-6	0,06 - 0,15	1,4 - 1,85	0,80 - 1,15
ER90S-D2	0,06 - 0,12	1,2 - 2,10	0,5 - 0,80

Tabela 7 – composição química típicas dos arames sólidos para soldagem.

Fonte: Fonte: SOARES, Giacomo Gai, 2015 (2021)

Classificação	Tensão de escoamento	Resistência à Tração	Alongamento (%)
ER70S-6	420(MPa)	540 (MPa)	30
ER90S-D2	620 (Mpa)	705 (Mpa)	26

Tabela 8 – Características mecânicas típicas dos arames sólidos para soldagem.

Fonte: Fonte: SOARES, Giacomo Gai, 2015 (2021)

2.6 JUNTAS SOLDADAS

A soldagem por fusão a arco elétrico provoca uma fusão localizada no material. Isso acontece devido a um movimento físico da fonte de calor provocando mudanças físicas de estado do material envolvido no processo (sólido-líquido-sólido), causando transformações metalúrgicas na região da soldagem. Existe uma perda de calor por condução, radiação e convecção que afetará o rendimento térmico no processo. Considera-se que existe uma variação térmica na formação da junta soldada, caracterizando três regiões na metalurgia da soldagem, sendo: zona de fusão (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) ou zona afetada pelo calor (ZAC) e o metal base.

Na metalurgia da soldagem denomina-se junta soldada as partes sobre a qual a solda será realizada e que por decorrência dos efeitos e parâmetros de soldagem tenham ocorrido alterações consideráveis em suas condições iniciais. Levando em conta aos requisitos de projeto e processo como: espessura das peças, processo de soldagem utilizado, condições de soldagem, material de adição e distorção admissível (SCHEIDMANDEL, 2013).

A fusão do metal base e do metal de adição é denominada poça de fusão, é constituída por uma parte do metal de base que sofre fusão pelo calor fornecido pelo processo e outra parte é o metal de adição. Na maioria dos processos de soldagem e em especial naqueles de fusão, as juntas soldadas apresentam várias zonas distintas em função da soldagem. Cada zona indicada possui uma particularidade, as quais devem ser analisadas. A figura 7 mostra as regiões de uma junta soldada.

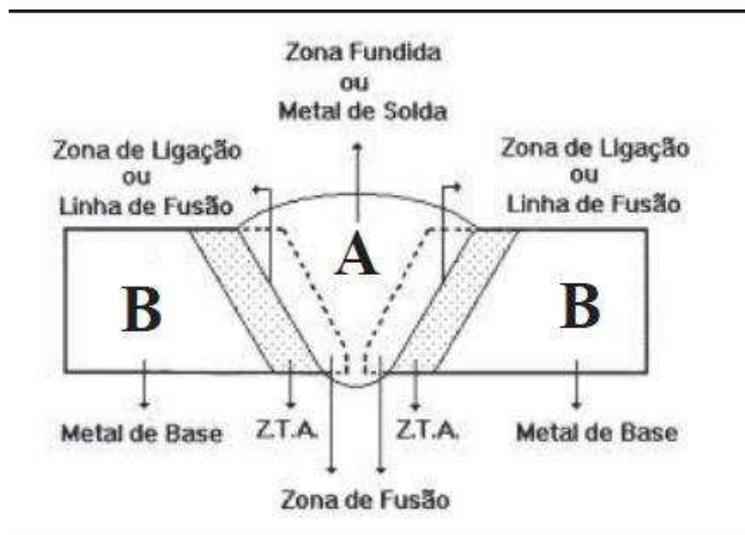


Figura 7: Representação de uma junta soldada e das zonas afetadas.

Fonte: SCHEIDMANDEL, Nilo Alberto, 2013 (2021)

3 METODOLOGIA OU PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Posteriormente a revisão bibliográfica, no qual foi abordado noções técnicas e de características dos aços ARBL, processo de soldagem GMAW, parâmetros de soldagem, consumíveis, vantagens e limitações do processo, em seguida, será descrito os processos empregados, experimentos utilizados e análises realizadas.

Na figura 8 apresenta os procedimentos metodológico do estudo.

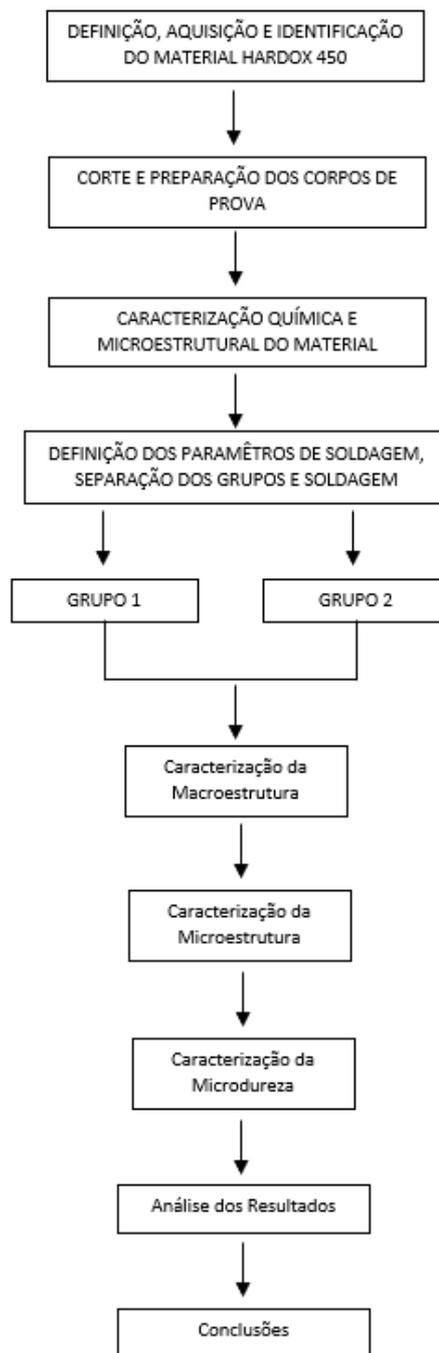


Figura 8 – Procedimento metodológico do estudo.

Fonte: Autor (2021)

3.1 Aquisição e Identificação do material

Para o início do procedimento, foi adquirido o material proposto neste experimento, sendo uma chapa, vista na figura 9, com dimensões de 1000 x 300mm e uma espessura de 10mm de aço Hardox 450, para ser realizado algumas análises de caracterização microestrutural, microdureza e análise química, para verificar o metal.

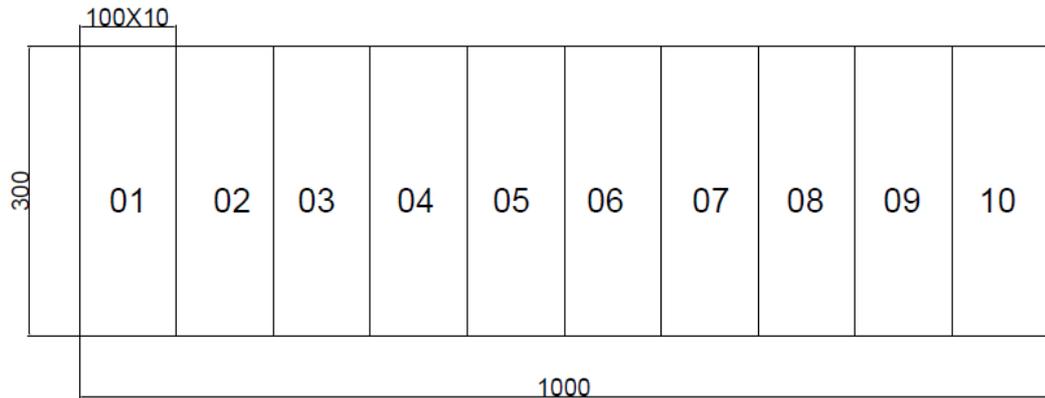


Figura 9 – Chapa do metal a ser estudado.

Fonte: Autor (2021)

3.2 Corte e preparação do metal em amostras especificadas.

A chapa de metal foi cortada no dimensionamento das amostras necessárias para o experimento, foi efetuado o corte a plasma e usinadas nas extremidades em torno de 1,5 à 2mm para poder descartar qualquer possibilidade de alteração na estrutura do material devido ao calor fornecido no corte. A escolha do processo foi devido a espessura e dureza do material, e por limitações de máquinas.

Para o corte foi efetuado um desenho usando o software SolidWorks, demonstrado através da figura 10, as dimensões necessárias para garantir o dimensionamento final de 200x300mm com uma junta em V com um ângulo de 60°. Para a junta em v foi utilizada uma fresa de perfil com modelo pronto de entalhe. Na figura 11 os processos já realizados.

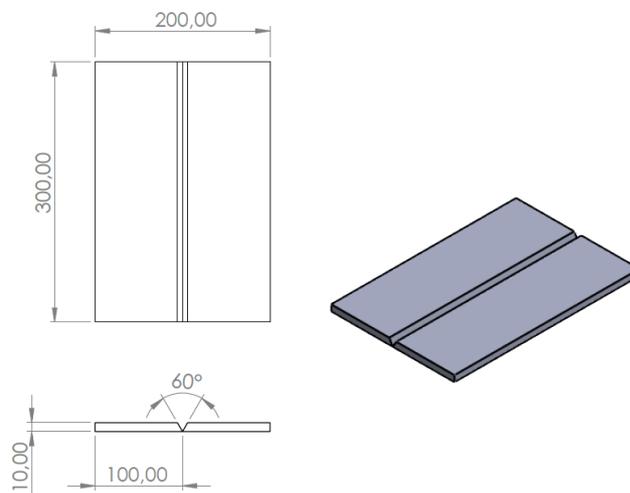


Figura 10 – Desenho de corte da chapa.

Fonte: Autor (2020)

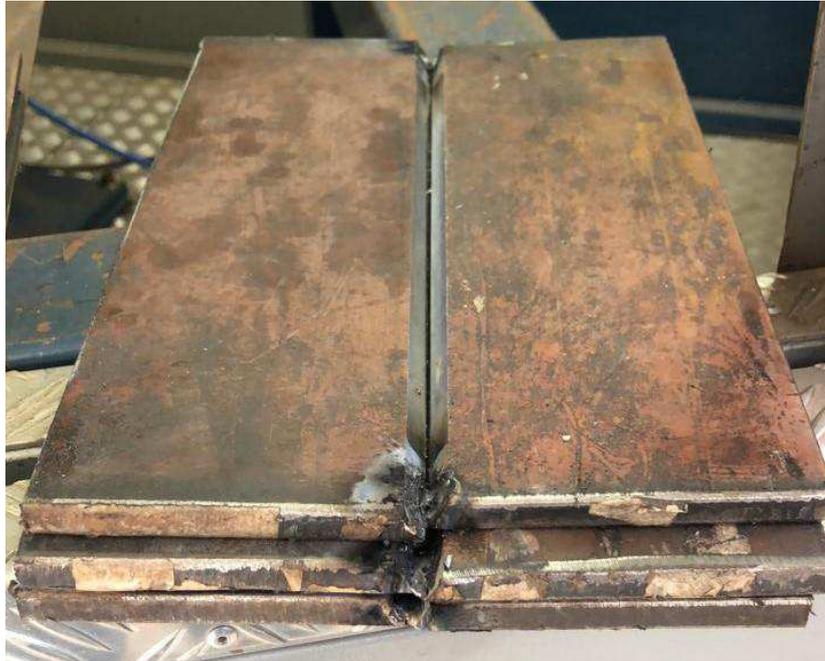


Figura 11 – Processos efetuados nas chapas em análise.

Fonte: Autor (2021)

3.3 Separação das amostras em grupos

Após o corte dos corpos de prova, foi necessário avaliar o dimensionamento final das amostras, para não surgir o fato de serem incompatíveis para o experimento, seguindo as medidas do desenho proposto anteriormente.

As amostras foram separadas em dois grupos. Cada grupo foi composto por duas chapas de 100x300mm com espessura de 10mm, para posteriormente serem experimentadas no processo de soldagem, cada grupo teve uma variação, sendo elas, níveis de corrente do passe de raiz e passe de preenchimento e o tipo de arame de solda. Feito isso, foi feita a caracterização de metalografia e microdureza.

3.4 Consumíveis de soldagem

Para confecção das juntas soldadas, foram utilizados os arames sólidos AWS ER70S-6 e AWS ER90S-D2 com diâmetro de 1,2mm. As tabelas abaixo mostram respectivamente a composição química e propriedades mecânicas dos elementos de adição utilizados no processo.

Classificação	Composições Químicas Típicas (%)		
	C	Mn	Si
ER70S-6	0,06 - 0,15	1,4 - 1,85	0,80 - 1,15
ER90S-D2	0,06 - 0,12	1,2 - 2,10	0,5 - 0,80

Tabela 9 – composição química típicas dos arames sólidos para soldagem AWS ER70S-6 e AWS ER90S-D2.

Fonte: SOARES, Giacomo Gai, 2015 (2021)

Classificação	Tensão de escoamento	Resistência à Tração	Alongamento (%)
ER70S-6	420(MPa)	540 (MPa)	30
ER90S-D2	620 (Mpa)	705 (Mpa)	26

Tabela 10 – Características mecânicas típicas dos arames sólidos para soldagem AWS ER70S-6 e AWS ER90S-D2.

Fonte: Fonte: SOARES, Giacomo Gai, 2015 (2021)

3.5 Procedimento de Soldagem

Após a preparação das peças os conjuntos foram soldados no processo GMAW. Foi utilizado o robô de solda OTC DP-400, localizado no laboratório da UPF, onde foi desenvolvido o processo.

Foi utilizado um corpo de prova para ajustar os parâmetros de soldagem para garantir o passe de raiz, passe de preenchimento, a penetração total, amperagem, tipo de corrente, frequência, tecimento e velocidade.

Foram soldados dois (2) conjuntos de prova, utilizando-se um gás 85% Ar e 15% CO₂, o arame de solda ER70S-6 com diâmetro de 1,2mm. Para o passe de raiz foi utilizada uma corrente pulsada de 130A, com uma velocidade de 20cm/min, frequência de 0,5 Hz e um tecimento de 1mm de amplitude. Para o passe de preenchimento foi definido que um passe seria suficiente, foi utilizada uma corrente contínua 220A, uma velocidade de 12cm/min, frequência de 0,5 Hz e um tecimento de 4mm de amplitude. Nas figuras 12 e 13 estão representados o passe de raiz e o passe de preenchimento.



Figura 12 – Passe de raiz e preenchimento ER70S-6.

Fonte: Autor (2021)

Foram soldados outros dois (2) conjuntos de prova, utilizando-se um gás 85% Ar e 15% CO₂, o arame de solda ER90S-D2 com diâmetro de 1,2mm. Para o passe de raiz foi utilizada uma corrente pulsada de 130A, com uma velocidade de 20cm/min, frequência de 0,5 Hz e um tecimento de 1mm de amplitude. Para o passe de preenchimento foi definido que um passe seria suficiente,

foi utilizada uma corrente contínua 220A, uma velocidade de 12cm/min, frequência de 0,5 Hz e um tecimento de 4mm de amplitude. Nas figuras abaixo estão representados o passe de raiz e o passe de preenchimento.



Figura 13 – Passe de raiz e preenchimento ER90S-D2.

Fonte: Autor (2021)

Após o processo de soldagem concluído e avaliado a qualidade da solda, serão preparados os corpos de prova para análise de macrografia, micrografia e microdureza.

3.6 Caracterização de macrografia e microestrutura

Após realizar o processo de soldagem dos conjuntos, foi extraído algumas amostras cortadas na seção transversal à solda, na análise de macrografia para identificação de possíveis falhas como, porosidade, inclusões macro, trincas entre outros e micrografia, caracterizando três regiões na metalurgia da soldagem, sendo: zona de fusão (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) ou zona afetada pelo calor (ZAC) grãos finos (GF) e grãos grosseiros (GG) e o metal base. As amostras foram embutidas em baquelite e lixadas até a condição para acabamento espelhado com alumina. Foi utilizado ataque químico (NITAL 2%) para identificação da microestrutura, conforme procedimento usual para a análise. Para macroestrutura as amostras indicadas na figura 14 foram submetidas ao ataque químico (NITAL 10%).



Figura 14 - Representação dos C.P. onde foram realizados ensaios de macrografia e micrografia.

Fonte: Autor (2021)

3.7 Caracterização de microdureza

Dentre as técnicas mais comuns para o ensaio de dureza está a Dureza Vickers, que utiliza uma ferramenta muito pequena, feita de diamante e com geometria piramidal. Foi realizado o ensaio de microdureza com uma carga de 1 kgf com uma distância de 1mm, medindo ao longo do corpo de prova como indicado na figura 15. Deste modo, sendo analisadas as regiões do material base, ZAC (GF), ZAC (GG) e material de adição.

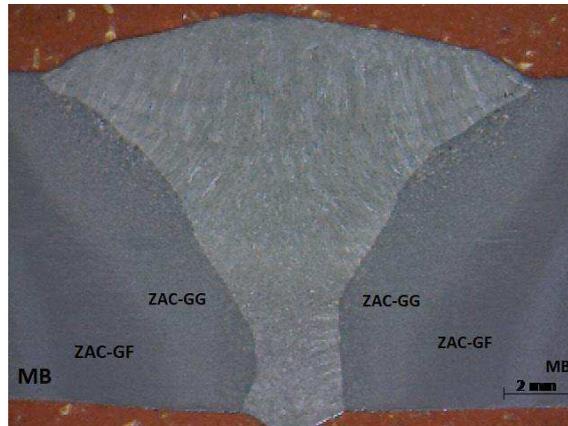


Figura 15 - Representação das regiões do C.P. onde foram realizados ensaios de microdureza.

Fonte: Autor (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da Microestrutura do Metal de Base

A microestrutura de um material compreende, em poucas palavras, tipicamente as diferentes fases e o modo como elas são arrançadas. Para o estudo da microestrutura, foi efetuada uma análise metalográfica, utilizando como reagente ácido nital. As figuras 16 e 17 foram obtidas utilizando microscopia óptica com ampliação de 500x e 1000x, representando as fases formadas na amostra do experimento. Em sua composição é encontrada grandes camadas de ferrita e martensita.

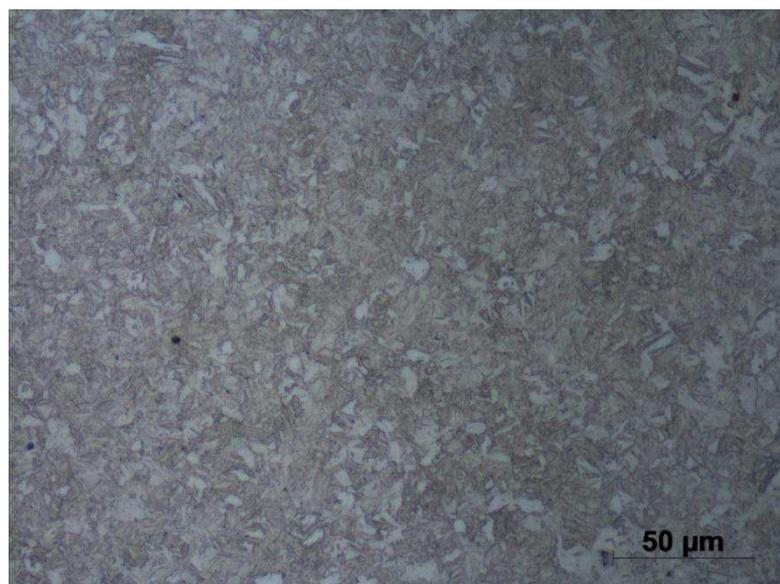


Figura 16 – Microestrutura do material Hardox 450 com ampliação de 500x.

Fonte: Autor (2020)

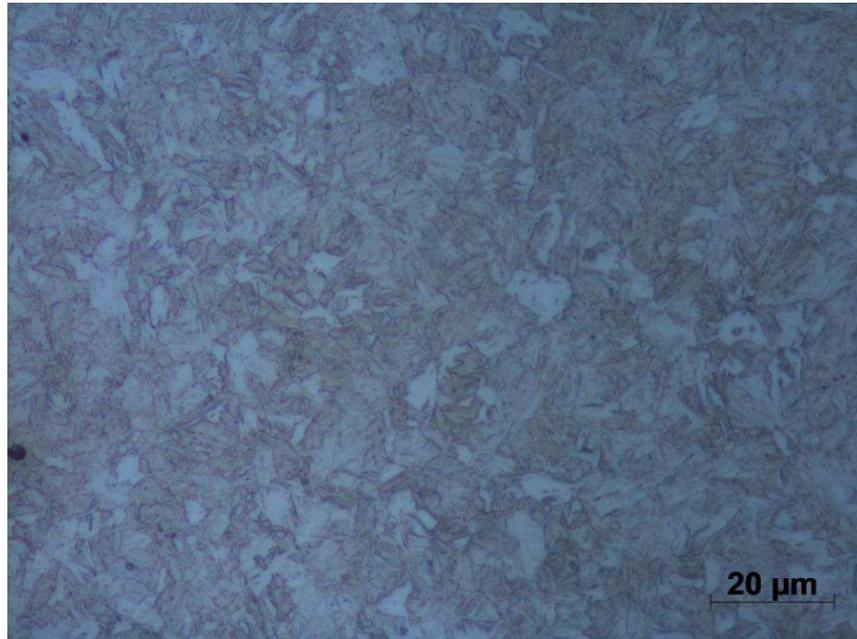


Figura 17 – Microestrutura do material Hardox 450 com ampliação de 1000x.

Fonte: Autor (2020)

A constituição de ferrita é formada por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa. É o constituinte mais mole dos aços, porém é o mais tenaz, e o mais maleável, sua resistência a tração é de 28 daN/mm². Pode também manter em solução de substituição a outros elementos tais como Si, P, Ni, Cr, Cu, que aparecem nos aços, bem como impurezas como elementos de ligação. Se o aço é muito pobre em carbono, sua estrutura está formada quase que totalmente por grãos de ferrita cujos limites podem ser revelados facilmente com o microscópio, depois de um ataque nital 2% durante 15 segundos de imersão. Os grãos são equiaxiais.

A constituição de martensita é uma solução sólida, intersticial, supersaturada de carbono em ferro alfa. É o constituinte estrutural da têmpera dos aços e sua microestrutura apresenta-se na forma de agulhas cruzadas. Os átomos de carbono estão nas faces e nas arestas, apresenta por isso uma rede distorcida. Esta distorção da rede é a responsável pela dureza da martensita. Apresenta uma rede tetragonal. Suas características mecânicas são resistência a tração entre 170 – 250 kg/mm².

4.2 Análise Química

A análise química é um conjunto de técnicas de laboratório utilizada para identificar a espécie e caracterização do material envolvida, conseguindo identificar juntamente a sua percentagem de elementos compostos na microestrutura podendo realmente ter certeza se o material a ser estudado realmente é o proposto.

Após executadas cinco queimas se obtém uma análise química média do material Hardox 450. A tabela 11 identifica os elementos que compõem o material e também respectivamente seu percentual.

Elemento Químico %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
	0,0744	0,28	2,38	0,0082	0,001	0,938	0,0206	0,0041	0,0005

Tabela 11 – Percentual e elementos que compõem o material Hardox 450 em análise.

Fonte: Autor (2020)

A composição apresentada caracteriza realmente os aços ARBL, tendo como características os seus elementos de liga para melhorar as propriedades mecânicas e resistência. Eles ajudam na melhora do aumento de resistência mecânica e oxidação, resistência a corrosão, aumenta limite de elasticidade, tenacidade e resistência ao impacto, refina a granulação, desoxidação, eleva o limite de escoamento e na qualidade superficial. Essas melhoras são feitas a partir de vários elementos de liga na estrutura com baixo percentual adicionado de cada componente. O que resulta também em uma boa soldabilidade e usinagem destes tipos de material. A tabela 12 informa os percentuais máximos especificados de cada elemento.

ELEMENTO QUÍMICO	C max %	Si max %	Mn max %	P max %	S max %	Cr max %	Ni max %	Mo max %	B max %
%	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,5	0,60	0,005

Tabela 12 – Composição química especificada do Hardox 450.

Fonte: VIEGAS, Daniel, 2016 (2020).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MACROESTRUTURA

A análise de caracterização da macroestrutura tem como objetivo nos mostrar de uma forma macro possibilitando a observação da homogeneidade e verificação de presença de defeitos macros como: porosidade, trincas, inclusões macro, entre outros. Em soldagem tem-se interesse em verificar no ensaio, a geometria da peça e organização dos cordões de solda depositados na junta, verificar defeitos ou discontinuidades de soldagem, a região de transição entre o metal de base e o metal de deposição, chamada de ZTA (zona termicamente afetada) ou ZAC (zona afetada pelo calor).

Após a soldagem dos conjuntos e executada a análise de macrografia, pode-se afirmar que o processo de soldagem ficou dentro dos parâmetros esperados, tendo uma penetração total e homogeneidade na soldagem, livre de inclusões macro ou trincas. Nas figuras 18 e 19 pode-se comprovar a caracterização de macrografia com os arames ER70S-6 e ER90S-D2.

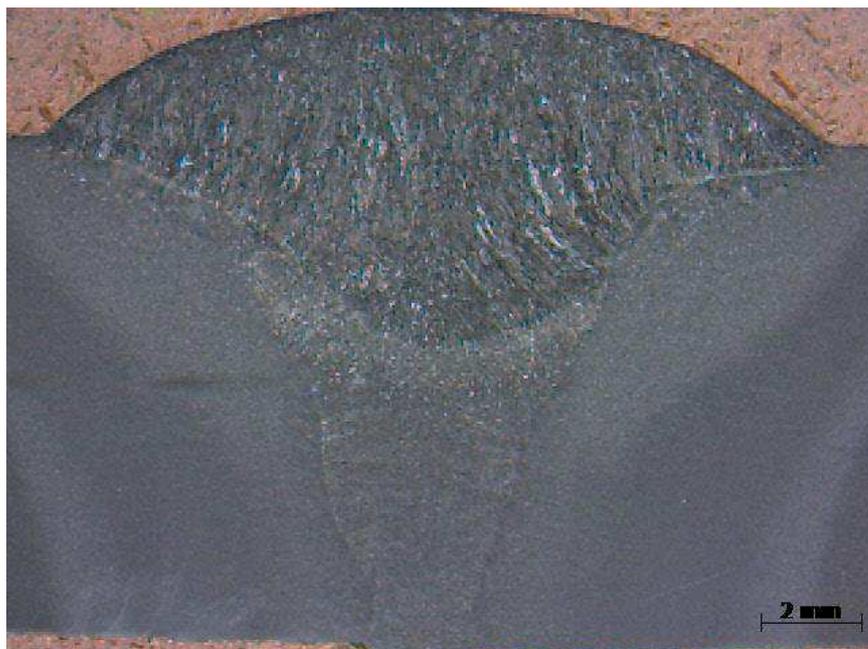


Figura 18 – Caracterização macrográfica do arame ER70S-6.

Fonte: Autor (2021)

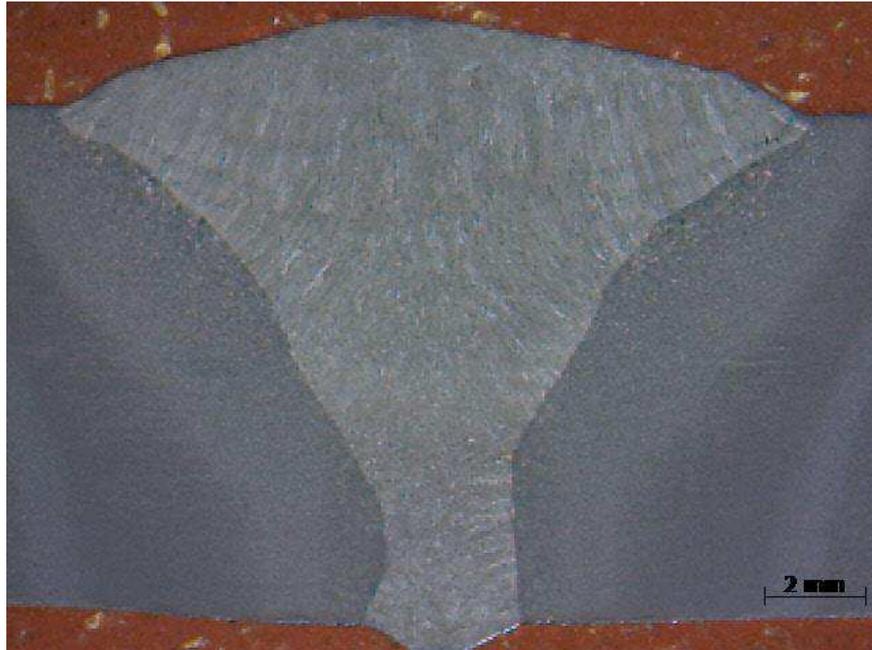


Figura 19 – Caracterização macrográfica do arame ER90S-D2.

Fonte: Autor (2021)

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

Os materiais foram soldados conforme as condições descritas na metodologia e a microestrutura do metal de base é comprovada novamente que realmente é um aço ARBL Hardox 450, caracterizado por uma microestrutura composta por uma grande camada de ferrita (áreas claras) e martensita (região mais escura), como mostra a figura 20.

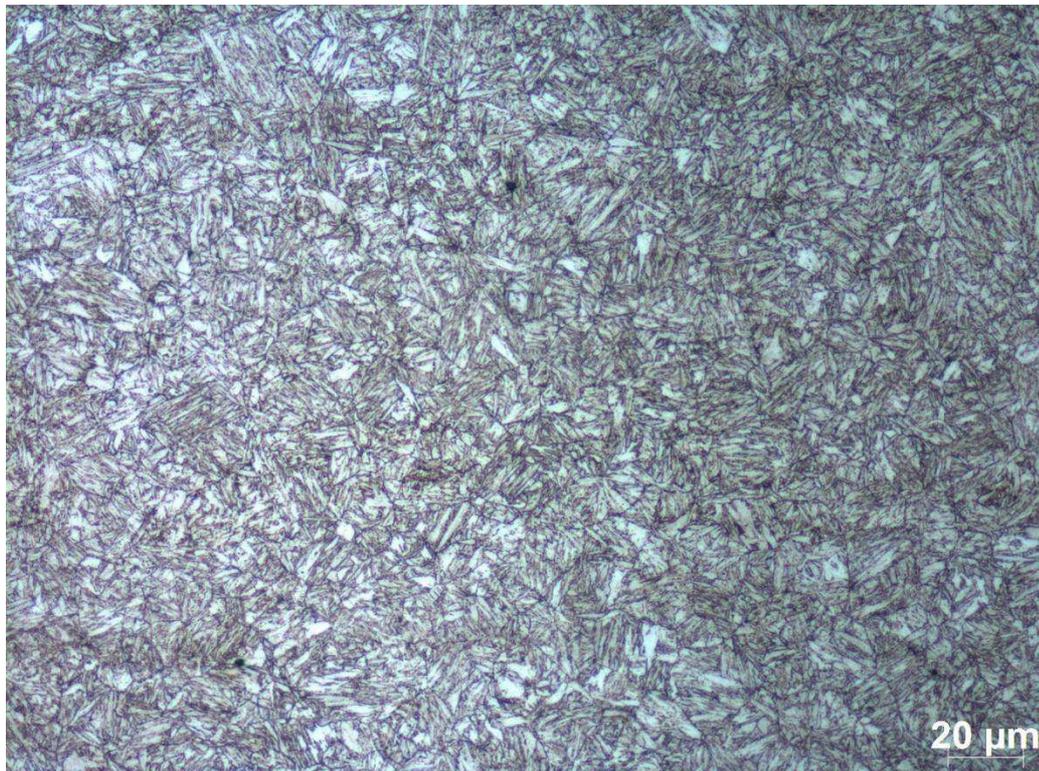


Figura 20 – Caracterização micrográfica do metal de base: ferrita (F); martensita (M).

Fonte: Autor (2021)

Segundo G. Thewlis (2004), na ZAC (zona afetada pelo calor) gerou nas duas condições propostas duas regiões, uma mais grosseira, chamada de ZAC de grãos grosseiros (ZAC-GG) e outra estrutura mais refinada, ZAC de grãos finos (ZAC-GF). Na figura 21, aonde indica o metal de adição ER70S-6, é possível verificar que a microestrutura é composta por ferrita poligonal e ferrita acicular, aonde a maior parte é composta por ferrita poligonal. Na figura 22 no metal de adição ER90S-D2 sua microestrutura é composta também por ferrita poligonal e ferrita acicular, onde a maior parte da microestrutura é composta por ferrita acicular. Nas figuras 23 e 24 na região da ZAC-GG com MA ER70S-6 e ER90S-D2, é caracterizada por uma microestrutura composta de ferrita poligonal, ferrita de Widmanstätten e uma pequena parte de martensita. Nas figuras 25 e 26 a microestrutura é caracterizada por ferrita e perlita recristalizados.

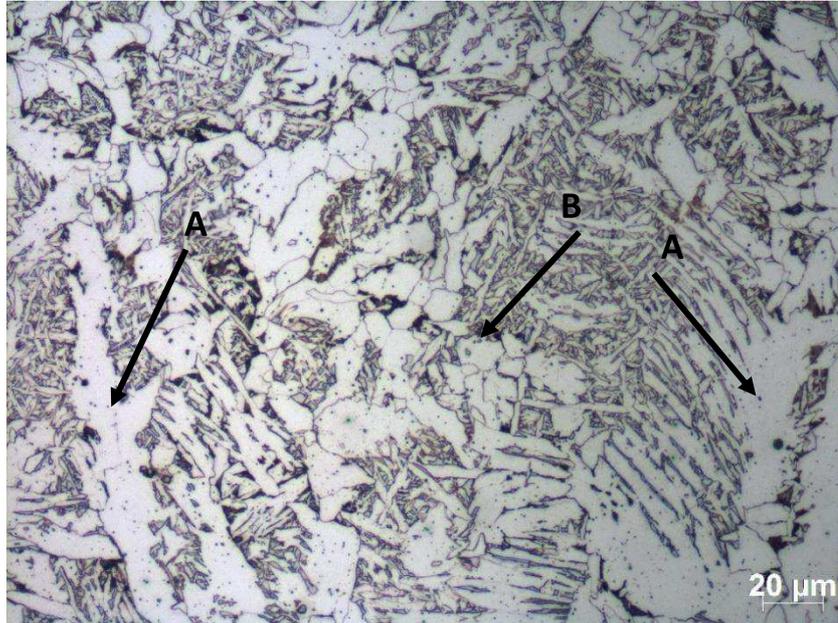


Figura 21 – Metal de adição ER70S-6: ferrita poligonal (A), ferrita acicular (B).

Fonte: Autor (2021)

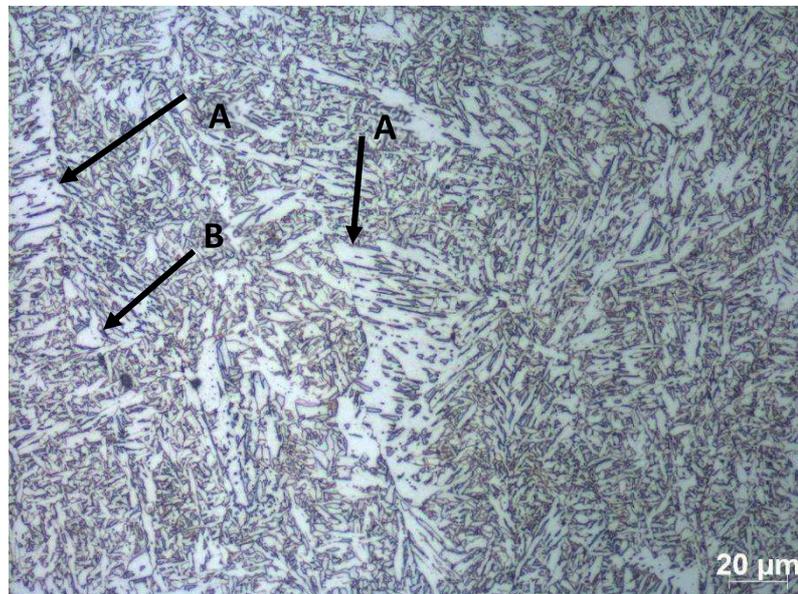


Figura 22 – Metal de adição ER90S-D2: ferrita poligonal (A), ferrita acicular (B).

Fonte: Autor (2021)

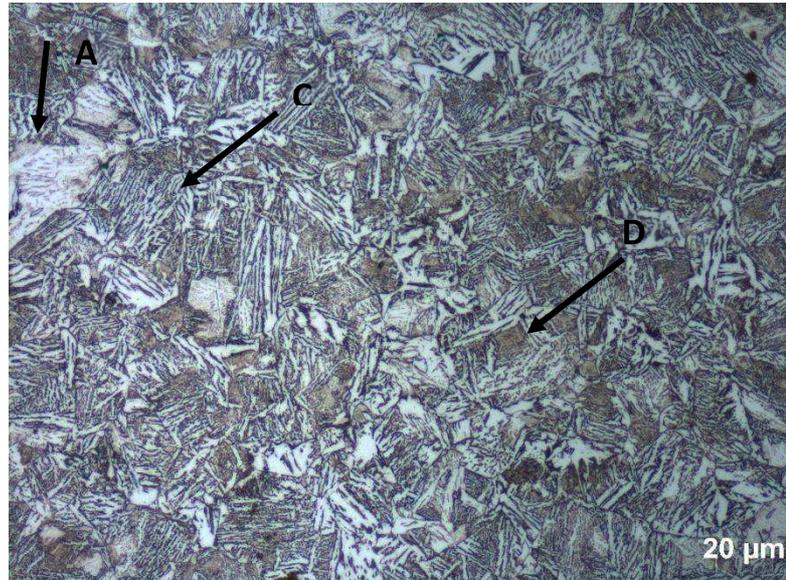


Figura 23 – ZAC-GG arame ER70S-6: ferrita poligonal (A), ferrita de Widmanstätten (C), martensita (D).
 Fonte: Autor (2021)

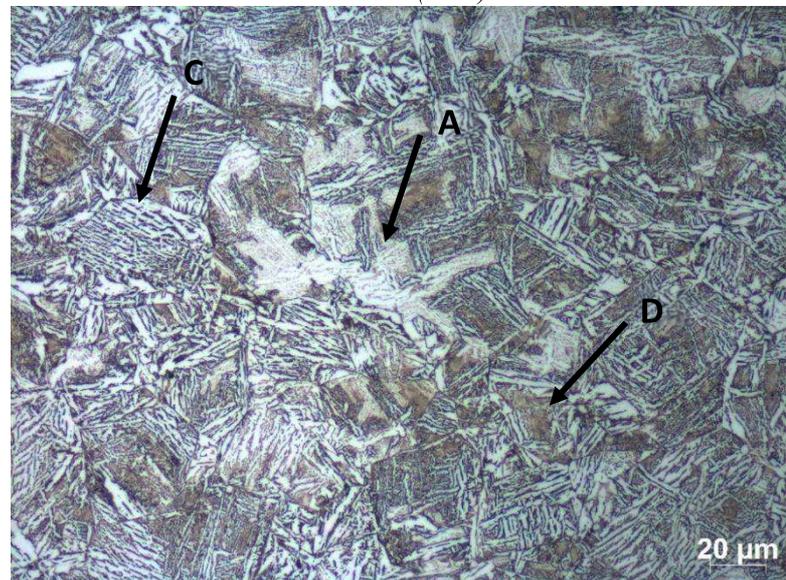


Figura 24 – ZAC-GG arame ER90S-D2: ferrita poligonal (A), ferrita de Widmanstätten (C), martensita (D).
 Fonte: Autor (2021)

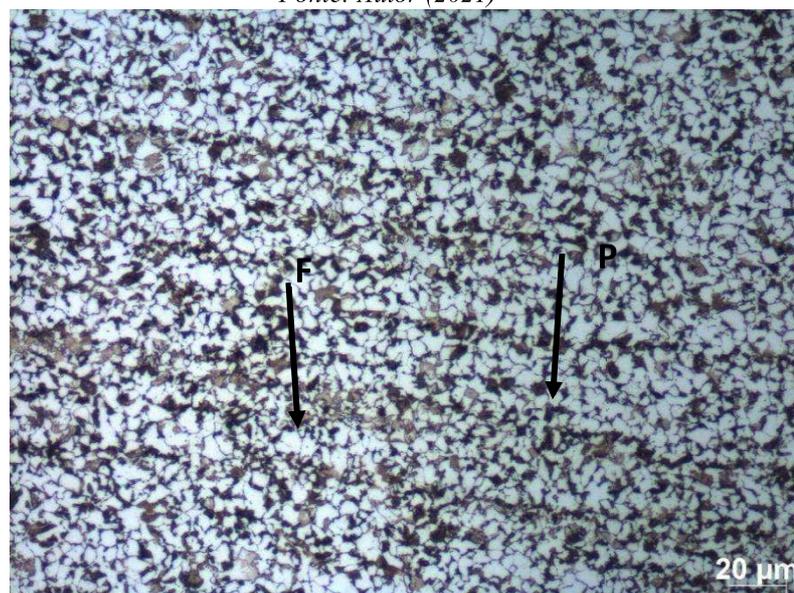


Figura 25 – ZAC-GF arame ER70S-6: ferrita (F), perlita (P), microestrutura recristalizada.
 Fonte: Autor (2021)

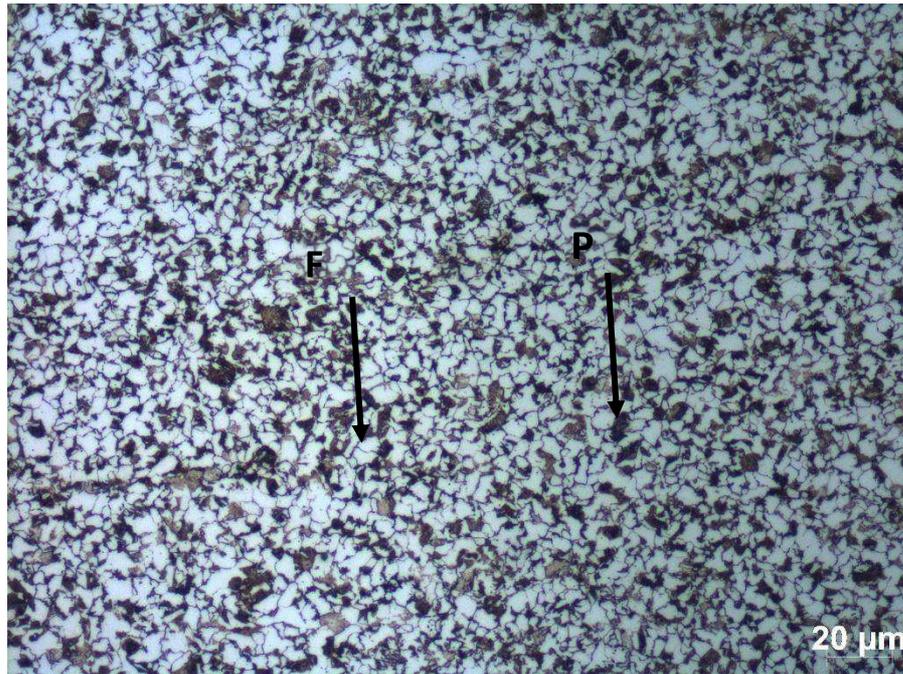


Figura 26 – ZAC-GF arame ER90S-D2: ferrita (F), perlita (P), microestrutura recristalizada.

Fonte: Autor (2021)

As figuras 27 e 28 apresentam os perfis de microdureza medidos na extensão da junta soldada. São mostrados os valores das distintas regiões da solda (MB, ZAC-GF, ZAC-GG e MA) para as condições realizadas.

Observa-se que nas duas condições propostas, no perfil superior e inferior dos mesmos o que se mantém com uma dureza mais elevada é o metal de adição ER90S-D2. É possível observar que na região do metal de base (MB) ele se mantém constante nos dois conjuntos, e do metal de adição (MA) a dureza se mantém mais elevada ainda no ER90S-D2, tanto no perfil superior como no inferior nas duas condições. Na região da ZAC de grãos finos (ZAC-GF) e na ZAC de grãos grosseiros (ZAC-GG) também é possível observar que a dureza se mantém mais elevada no MA ER90S-D2 entre os perfis superiores e os perfis inferiores.

O MB apresenta uma variação entre 283 a 325 HV, tendo uma microestrutura composta por uma grande parte de ferrita e martensita. Na análise com o metal de adição (MA) ER90S-D2, nota-se que a dureza se mantém entre 222 a 240 HV, com uma composição de ferrita acicular e ferrita poligonal, sendo que a maior parte é composta por ferrita acicular. No metal de adição (MA) ER70S-6 é possível observar que a dureza fica entre 186 a 206 HV, com uma composição de ferrita acicular e ferrita poligonal, contendo a maior parte de ferrita poligonal.

Na região da ZAC-GF no passe de preenchimento (Perfil superior) tem uma queda na dureza, com metal de adição ER90S-D2 é possível observar que a dureza fica entre 195 e 287 HV, e com metal de adição ER70S-6 fica entre 192 a 259 HV, devido a sua microestrutura ser caracterizada por uma grande parte de ferrita e perlita recristalizados, deixando a microestrutura mais maleável, e ganha um aumento na dureza quando se aproxima da ZAC-GG. Ainda no perfil superior na região da ZAC-GG nota-se um aumento de dureza, com o MA ER90S-D2 que fica em torno de 265 a 290 HV, e com MA ER70S-6 fica entre 245 a 270 HV contendo a microestrutura composta de ferrita poligonal, ferrita de Widmanstätten e uma pequena parte de martensita.

Nos perfis inferiores a região da ZAC-GF tem uma queda na dureza, com MA ER90S-D2 fica em torno de 190 a 249 HV, com MA ER70S-6 fica entre 185 a 229 HV, crescendo gradativamente

para a região da ZAC-GG obtendo-se valores para a dureza no MA ER90S-D2 entre 238 a 269 HV, e no MA ER70S-6 entre 180 a 239 HV.

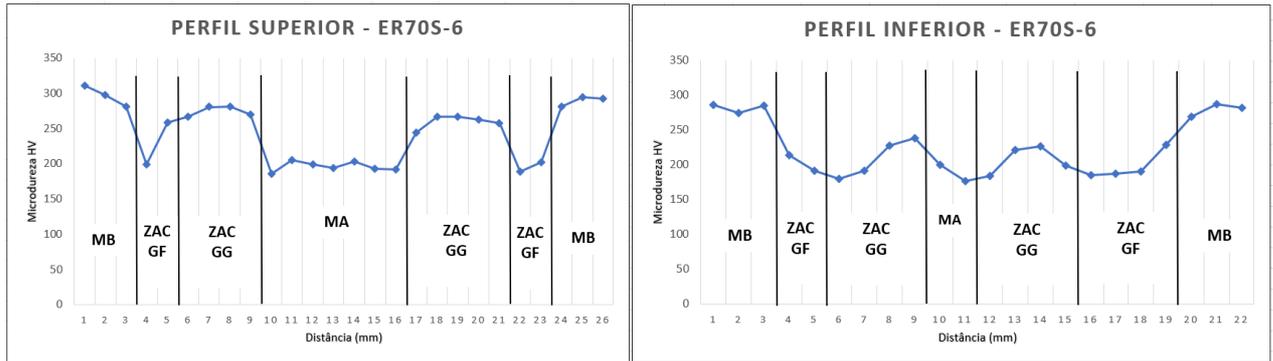


Figura 27 – Microdureza realizado no perfil ER70S-6.

Fonte: Autor (2021)

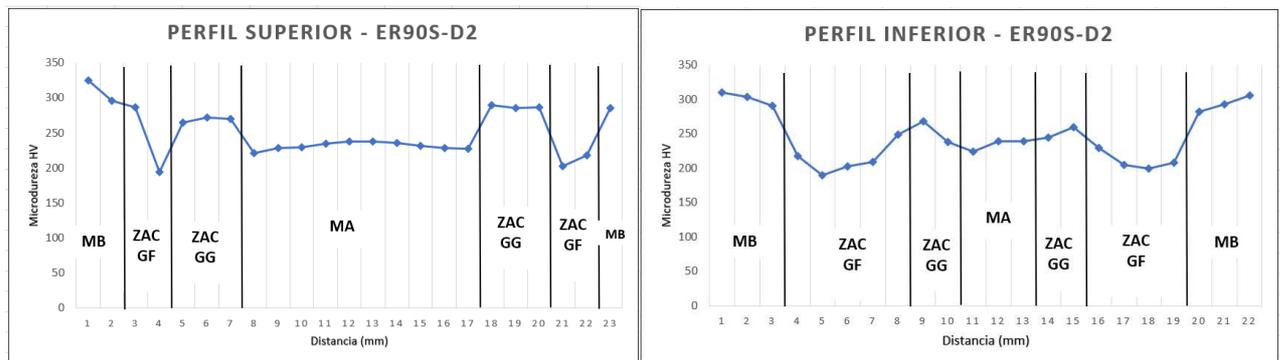


Figura 28 – Microdureza realizado no perfil ER90S-D2.

Fonte: Autor (2021)

5 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos na análise que foi desenvolvida, possibilitou concluir que o metal de adição ER90S-D2 tem um comportamento melhor do que o metal de adição ER70S-6, pois é possível verificar que a dureza ao longo do conjunto soldado se mantém mais elevada. Isso é comprovado pela microestrutura dos metais de adição, o metal de adição ER90S-D2 sua microestrutura é composta por ferrita acicular e ferrita poligonal, com maior parte em ferrita acicular que eleva a resistência mecânica do material pelo formato de grão acicular. Já o metal de adição ER70S-6 sua microestrutura também é caracterizada por uma microestrutura composta por ferrita acicular e ferrita poligonal, com maior de parte de ferrita poligonal, tendo um formato de grão maior, isso explica o porquê a dureza é menor, levando em conta que isso afeta diretamente na resistência mecânica do material e na vida útil do mesmo.

Com os resultados obtidos comprova que o melhor metal de adição a ser utilizado neste caso é o ER90S-D2, mas para manter uma dureza ainda mais elevada poderia ser utilizado o metal de adição ER1105S, devido a sua composição microestrutural.

6 ETAPAS FUTURAS

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Avaliação de análise fractográfica do aço Hardox 450 na região de impacto;
- Análise de tenacidade ao impacto na zona fundida, para determinar a resistência mecânica da junta soldada nas condições propostas;

- Realizar soldagem de novos grupos com metal de adição ER1105S, efetuando as mesmas análises de macrografia, micrografia, microdureza e resistência ao impacto, para realizar a comparação entre os metais de adição;
- Realizar soldagem no mesmo material variando os níveis de corrente de soldagem e os metais de adição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGER, Djeison Rangel. **Determinação dos melhores parâmetros de processo para a soldagem robotizada do aço LNE 700**. TCC (Engenharia Mecânica) – Fator Faculdade Horizontina, Horizontina, 2012.

CALLISTER JR., William D. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: uma introdução**. 7^a edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.

CARLESSO, Rodrigo. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS SOLDADAS DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA**. 113 Páginas. Dissertação (Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2017.

COSTA, Vagner Machado. **Caracterização mecânica e metalúrgica de juntas dissimilares de aços de alta resistência e baixa liga**. Diplomação (Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CARVALHO, Renon Steinbach. **Robô CNC para a automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade**. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2009.

CHIAVERINI, Vicente. **AÇOS E FERROS FUNDIDOS**. 7^a edição. São Paulo: Estúdio JI de Artes Gráficas S/C Ltda., 2002.

CRUZ, Magnus Geder Henz. **Estudo da substituição de aço convencional por aço de baixa liga e alta resistência (BLAR) em módulo estrutural**. Dissertação (Mestre em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul 2006.

ESMELINDRO, Oséias Matias de Oliveira. **COMPORTAMENTO DA VIDA EM FADIGA DE JUNTA SOLDADA DO AÇO LN-700**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Projetos e Processos de Fabricação) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo 2015.

JÚNIOR, Aliton Ribeiro de Avelar. **INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE LAMINAÇÃO A QUENTE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO ARBL DA CLASSE 700MPa DE LIMITE DE ESCOAMENTO**. Dissertação (Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2013.

KRUGER, Eduardo Leira. **Charpy Instrumentado: Análise da Instrumentação e da Influência de Condições Metalúrgicas de um Aço de Ultra-alta Resistência Mecânica na Tenacidade à Fratura Dinâmica**. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2009.

MACHADO, Ivan Guerra. **SOLDAGEM E TÉCNICAS CONEXAS: processos**. Porto Alegre. 1996.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **SOLDAGEM: Fundamentos e Tecnologia**. 3^a edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2001.

MELO, Anna Clara de Souza Fernandes. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE AÇOS MICROLIGADOS PARA APLICAÇÃO ESTRUTURAL COMO LONGARINA**. Tese de Doutorado (Programa em Projeto em Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2019.

OKIDO, Nilo Yusuke. **Análise comparativa das propriedades mecânicas de chapas finas de aço Hardox 450 soldadas através dos processos MAG e TIG**. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ORDÓÑEZ, Robert Eduardo Cooper. **SOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE DUTOS DE AÇO API 5L-X80 COM DIFERENTES ARAMES TUBULARES**. Dissertação (Materiais e Processos de Fabricação) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2004.

OSHIRO, Alfredo Yassuo. **PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE AÇOS COM DIFERENTES MICROESTRUTURAS OBTIDAS A PARTIR DO AÇO GRAU LNE 380 VISANDO APLICAÇÕES VEICULARES**. Dissertação (Materiais Avançados) - Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda 2013.

PÁRIS, Fabrício. **APLICAÇÃO DE VISÃO DE MÁQUINAS PARA GERAÇÃO DE PONTOS DE TRAJETÓRIA NUM PROCESSO DE SOLDAGEM ROBOTIZADO**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo 2015.

PERREIRA, Patrícia Apicelo de Souza. **EFEITOS DO HIDROGÊNIO NA JUNTA SOLDADA DO AÇO 2.25Cr-1Mo-0.25V: Propriedades Mecânicas e Difusão**. Tese (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro 2016.

PERINI, Felipe Gustavo. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. Dissertação (Mestre em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul 2008.

RIBEIRO, Henrique Varella. CARATCTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DE JUNTAS SOLDADAS A LASER EM UM AÇO ARBL. Tese (Materiais Convencionais Avançados) - Universidade de São Paulo, Lorena 2016.

THEWLIS, G. **CLASSIFICATION AND QUANTIFICATION OF MICROSTRUCTURES IN STEEL**. Materials Science and technology, Reino Unido, 2004.

TOMA, Rafael Eiji. **COMPARAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 PARA APLICAÇÃO EM BAIXA TEMPERATURA UTILIZANDO-SE A SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO**. Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo 2012.

VIEGAS, Daniel Bicalho. **Avaliação da resistência ao desgaste de um aço Hardox 450 submetido a solda de revestimento duro, com arame tubular DIN 8555/MF-10-GF-60-GR utilizando o processo FCAW**. Dissertação (Mestre em Engenharia dos Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte 2016.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fábio Décourt Homem. **SOLDAGEM: Processos e Metalurgia**. 4^a edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2004.