

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ESTUDO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE ÓXIDO DE
TITÂNIO NA SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO**

Luiz Guilherme Cabral e Silva

**Pindamonhangaba - SP
2023**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ESTUDO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE ÓXIDO DE
TITÂNIO NA SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO**

Luiz Guilherme Cabral e Silva

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação no Curso Superior de Tecnologia
em Processos Metalúrgicos.

Orientador: Prof. Dr. Edilon de Oliveira França
Coorientador: Prof. Msc. Romulo Lucas Borges

**Pindamonhangaba - SP
2023**

S586e

Silva, Luiz Guilherme Cabral e.

Estudo dos Efeitos da Adição de Óxido de Titânio na Soldagem por Arco Submerso / Luiz Guilherme Cabral e Silva / FATEC Pindamonhangaba, 2023.

51f.: il.

Orientador: Professor Dr. Edilon de Oliveira França

Co-orientador: Professor Rômulo Lucas Borges

Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2023

1. Arco Submerso. 2. Óxido de Titânio. 3. Diluição. 4. Penetração. I. Silva, Luiz Guilherme Cabral e. II. França, Edilon de Oliveira. III. Borges, Rômulo Lucas. IV. Título.

CDD 621

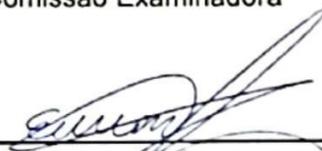
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“ESTUDO DOS EFEITOS DA ADIÇÃO DE ÓXIDO
DE TITÂNIO NA SOLDAGEM POR ARCO
SUBMERSO”.**

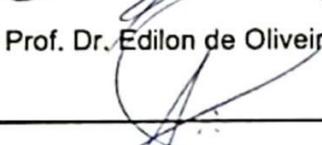
Luiz Guilherme Cabral e Silva

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Comissão Examinadora



Orientador – Prof. Dr. Edilon de Oliveira França



Membro – Prof. Dr. Jorge Luiz Rosa



Membro – Tecnólogo Ricelmo de Oliveira Pena

Pindamonhangaba, 21 de junho de 2023.

DEDICATÓRIA

Esse Trabalho de Graduação é dedicado aos meus pais, Rose Cabral e Silva Neto, e a minha melhor amiga e namorada, Raiane Fonseca. A presença, o carinho e a paciência dessas pessoas para comigo durante essa árdua jornada da Graduação foi extremamente importante.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus avós, Maria Ângela, Israel Carlos e Maria Aparecida, que sempre estiveram orando e torcendo.

Agradeço ao meu Orientador Professor Dr. Edilon de Oliveira França, por toda atenção, ensinamentos e cuidado.

Agradeço ao Laboratório de Soldagem da Fatec Pindamonhangaba e seus monitores, por todo auxílio. Este que serviu perfeitamente a mim e a outros colegas no desenvolvimento e aprimoramento de nossas pesquisas.

E agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram nessa jornada.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado. A imaginação cerca o mundo.”

Albert Einstein

SILVA, Luiz Guilherme Cabral e. **Estudo dos Efeitos da Adição de Óxido de Titânio na Soldagem por Arco Submerso**. 2023. 53p. Trabalho de Graduação do Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba – São Paulo. 2023.

RESUMO

O Processo de Soldagem por Arco Submerso é comumente utilizado na indústria, desde a siderúrgica até as gigantes marítimas. Mesmo sendo um dos processos de soldagem por fusão com maior produtividade, o mercado tem inovado constantemente focando principalmente em redução de custos e competitividade, com isso o surgimento de técnicas como a adição de pó metálico ao processo de soldagem por Arco Submerso cresce cada vez mais e busca melhor fusão do material base (MB) com o metal de adição, melhor acabamento e diminuição de diluição e penetração. Pensando nisso, este trabalho foi desenvolvido buscando analisar a influência da adição de Óxido de Titânio (TiO_2) no Processo de Soldagem por Arco Submerso. O trabalho foi realizado nas dependências da Fatec Pindamonhangaba, três corpos de prova foram submetidos a análise metalográfica e de espectrometria, sendo eles: CP 01, CP 02 e CP 03. O CP 01 não recebeu a adição de TiO_2 pois ele será a base de comparação, o CP 02 teve TiO_2 adicionado à frente do arco elétrico e o CP 03 teve o TiO_2 misturado ao fluxo numa proporção de 50% / 50%. A soldagem foi executada com os seguintes parâmetros: 29 Volts; 500 ampères; 36 cm/min de velocidade de soldagem; 25 mm de distância do bico de contato; e diâmetro do arame de 2,38 mm. A análise metalográfica mostrou que a adição de TiO_2 nos CPs 02 e 03 contribuiu para a diminuição da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e consequentemente a diminuição da diluição (apenas no CP 02) e penetração de solda. O TiO_2 não influenciou a microestrutura e a espectroscopia dos CPs 02 e 03, sendo os microconstituintes e elementos presentes os mesmos normalmente já observados.

Palavras-chave: Arco Submerso. Óxido de Titânio. Diluição. Penetração.

SILVA, Luiz Guilherme Cabral e. **Study of the Effects of Addition of Titanium Oxide in Submerged Arc Welding**. 2023. 53p. Graduation Work of the Technology Course in Metallurgical Processes. Pindamonhangaba College of Technology. Pindamonhangaba – São Paulo. 2023.

ABSTRACT

The Submerged Arc Welding Process is commonly used in industry, from the steel mill to the maritime giants. Even though it is one of the most productive fusion welding processes, the market has constantly innovated, focusing mainly on cost reduction and competitiveness. and seeks better fusion of the base material (MB) with the filler metal, better finishing and reduction of dilution and penetration. With that in mind, this work was developed seeking to analyze the influence of the addition of Titanium Oxide (TiO₂) in the Submerged Arc Welding Process. The work was carried out at Fatec Pindamonhangaba, three specimens were submitted to metallographic and spectrometry analysis, namely: CP 01, CP 02 and CP 03. CP 01 did not receive the addition of TiO₂ as it will be the basis of for comparison, CP 02 had TiO₂ added ahead of the arc and CP 03 had TiO₂ mixed into the flux in a 50% / 50% ratio. Welding was performed with the following parameters: 29 Volts; 500 amps; 36 cm/min welding speed; 25 mm distance from the contact tip; and wire diameter of 2.38 mm. The metallographic analysis showed that the addition of TiO₂ in CPs 02 and 03 contributed to the decrease of the Heat Affected Zone (HAZ) and consequently the decrease in dilution (only in CP 02) and weld penetration. TiO₂ did not influence the microstructure and spectroscopy of CPs 02 and 03, with the microconstituents and elements present being the same normally observed.

Keywords: Submerged Arc. Titanium Oxide. Dilution. Penetration.

Lista de Figuras

Figura 1 - Regiões solda de topo.....	15
Figura 2 - Seção transversal de uma solda de topo	15
Figura 3 - Representação da medida da diluição em seção transversal de um cordão de solda	16
Figura 4 - Exemplificação esquemática da penetração de solda	17
Figura 5 - Esquema Soldagem SAW	19
Figura 6 - Representação de um equipamento SAW	20
Figura 7 - Efeito isolado das principais variações de parâmetros da soldagem por arco submerso	23
Figura 8 - Estruturas Cristalinas do óxido de titânio	25
Figura 9 - Representação esquemática da Ferrita Acicular	26
Figura 10 - Fluxograma de atividades	30
Figura 11 - Chapas 01, 02 e 03	31
Figura 12 - Óxido de Titânio (TiO ₂).....	32
Figura 13 - Equipamento de soldagem por arco submerso.....	33
Figura 14 - Cortadeira de bancada	34
Figura 15 - Lixadeira de pistas	36
Figura 16 - Lixadeira circular automática	36
Figura 17 - Politriz circular; politriz da direita (pasta de diamante); politriz da esquerda (pasta de sílica).....	37
Figura 18 - Capela de exaustão.....	38
Figura 19 - Computador processando imagem através do Image Analysis / Microscópio Óptico Olympus CX 31	38
Figura 20 - Sequência de processo	39
Figura 21 - Macrografias com medidas da área superior, inferior e penetração (Ataque com NITAL 10% / Ampliação 50x).....	40
Figura 22 - Macro ZTA média de pontos. (Ataque com NITAL 10% / Ampliação 50x)	42
Figura 23 - Micrografia MB (Ataque com NITAL 2% / Ampliação 500x)	43
Figura 24 - Micrografia ZF (Ataque com NITAL 2% / Ampliação 500x)	44
Figura 25 - Micrografia ZTA (Ataque com NITAL 2% / Ampliação 500x).....	45
Figura 26 - Espectro dos CPs	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Densidade das fases do TiO ₂	26
Tabela 2 - Composição Química Teórica ASTM A 36	27
Tabela 3 - Composição química das chapas (ASTM A 36)	31
Tabela 4 - Descritivo de condições	31
Tabela 5 - Especificação do fabricante	32
Tabela 6 - Parâmetros de Soldagem	33
Tabela 7 - Renomeação das chapas após corte	34
Tabela 8 - Medição da diluição de solda	41
Tabela 9 - Largura ZTA	42

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 SOLDAGEM	14
2.1.1 Soldagem e Solda	14
2.1.2 Terminologia das regiões de solda	14
2.1.2.1 <i>Característica principal da Zona Fundida (ZF) - Diluição</i>	15
2.1.2.2 <i>Penetração / Penetração da junta</i>	17
2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM	18
2.3 SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO	19
2.3.1 Equipamento	20
2.3.2 Consumíveis	21
2.3.2.1 <i>Fluxos</i>	21
2.3.2.2 <i>Eletrodos</i>	22
2.3.3 Variações do Processo	22
2.3.2 Parâmetros de soldagem	23
2.4 ADIÇÃO DE PÓ METÁLICO NO PROCESSO	24
2.5 MICROCONSTITUINTES DA SOLDA	24
2.6 ÓXIDO DE TITÂNIO	25
2.6.1 Óxido de Titânio na Soldagem	26
2.7 AÇO ASTM A 36	27
2.7.1 Propriedades Físicas	28
2.7.2 Propriedades Mecânicas	28
2.7.3 Outras características do ASTM A 36	28
2.8 METALOGRAFIA	29
2.8.1 Macrografia	29
2.8.2 Micrografia	29
2.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)	29
3 METODOLOGIA	30
3.1 CHAPA DE AÇO ASTM A 36	31
3.2 ÓXIDO DE TITÂNIO	32
3.3 EQUIPAMENTO DE ARCO SUBMERSO	32
3.3.1 – Parâmetros de Soldagem	33
3.4 ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA (CP)	34
3.4.1 Procedimento de corte	34
3.4.2 Preparação dos Corpos de Prova	35
3.4.3 Polimento dos Corpos de Prova	36
3.4.4 Ataque Químico	37
3.4.5 Microscopia Óptica	38
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39

4.1 ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	40
4.1.1 Macrografia.....	40
4.1.1.1 <i>Cálculo da diluição</i>	41
4.1.1.2 <i>Macrografia ZTA</i>	42
4.1.2 Micrografia	43
4.1.2.1 <i>Micrografia do Material Base (MB)</i>	43
4.1.2.2 <i>Micrografias zona fundida</i>	44
4.1.2.3 <i>Micrografias ZTA</i>	45
4.2 MEV / EDS	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
6 TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem a arco submerso (*Submerged Arc Welding – SAW*) é largamente empregado em indústrias como as siderúrgicas, as mineradoras e as marítimas, pois é altamente produtivo e atende tranquilamente suas demandas (CUNHA *et al.*, 2018).

O arco submerso é datado de 1935 sendo mais utilizado no período da Segunda Grande Guerra (1939 – 1945). É um processo que ocorre por fusão, cujo a energia é provinda de um arco ou arcos em contato com a peça base e um eletrodo ou eletrodos. O arco elétrico é protegido por um fluxo granulado que o cobre por completo. O fluxo granulado age com um fundente, forma escória, protege a área em fusão de contaminantes atmosféricos e evita o resfriamento rápido (BUTTIGNON, 2001).

O material de base utilizado neste trabalho é uma liga de ferro e carbono comum, ASTM A 36. É um material que possui propriedades mecânicas bem definidas, é de fácil conformação e de excelente soldabilidade. O A 36 pode ser utilizado nos mais variados projetos, desde aplicações estruturais como em pontes, passarelas, plataformas até aplicações mais comuns como em cantoneiras, barras e perfis (LUZ, 2017).

O óxido de titânio é apropriado para diversas aplicações, ele apresenta propriedades fotocatalíticas e antimicrobianas. É útil no tratamento de água pois não é tóxico e tem baixo custo, e pode também decompor poluentes atmosféricos (D`ALESIO, 2013).

Diluição e penetração são fatores importantes em soldagem. Penetração é o quanto a fusão se estende no material base, e diluição é a parcela de compartilhamento entre material base e metal de adição (FELIZARDO, 2016). Tendo em mente a importância desses fatores, pesquisadores da área têm contribuído com estudos adicionando elementos químicos a solda a fim de promover uma penetração adequada e melhor diluição (MARÇAL; SPOLZINO, 2022).

Logo, o objetivo deste trabalho é investigar mais a fundo os possíveis efeitos da adição de óxido de titânio na soldagem por arco submerso, analisando composição química, microestrutura e variação na diluição e penetração de solda.

1.1 PROBLEMA

As perguntas a serem respondidas são: A adição de óxido de titânio na soldagem por arco submerso teve efeitos na solda? Houve alteração na composição química da solda? Quais microestruturas apareceram? Houve variação na diluição e penetração de solda?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos da adição de óxido de titânio no processo de soldagem por arco submerso.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar se houve alteração nos Corpos de Prova quando submetidos a adição de óxido de titânio e comparar com o Corpo de Prova que não recebeu adição de óxido;
- Caracterizar e estudar os corpos de provas através de análise microestrutural, e composição química;
- Calcular a diluição.

1.3 JUSTIFICATIVA

No mundo atual, sabe-se que o desenvolvimento tecnológico está diretamente relacionado com produtividade e redução de custos, principalmente no processo industrial, o que proporciona aumento nos lucros e competitividade (SILVA, 2020).

Logo, ao adicionar óxido de titânio ao processo, espera-se melhor diluição e penetração de solda, por conseguinte, aumento de produtividade e redução de custos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM

Conceituar soldagem não é trivial, isso porque, as técnicas existentes atualmente são muito versáteis. De acordo com a AWS (*American Welding Society*) soldagem é o processo de união de materiais, em sua maioria metálicos, através de aquecimento até uma determinada temperatura. Há indícios de que o processo de soldagem remota de milhares de anos atrás (FARIA *et al.*, 2021).

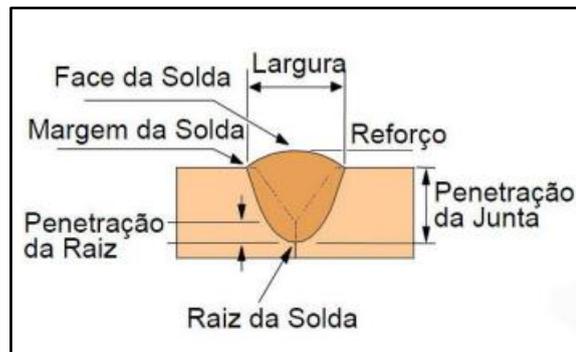
Por muitos anos, soldagem era apenas um processo de caldeamento usado por ferreiros, foi só no século XX, com a revolução industrial e com o desenvolvimento de novas técnicas que a soldagem vem a ter um papel importante nos processos de fabricação (FARIA *et al.*, 2021). Modenesi *et al.* (2011) diz que a soldagem é amplamente utilizada na indústria, com aplicações que partem desde a indústria eletrônica até o desenvolvimento de peças estruturais e equipamentos de altíssimo porte.

2.1.1 Soldagem e Solda

Soldagem é o processo que visa a união entre os materiais, e solda é a região por onde esses materiais foram unidos quando submetidos ao processo (FELIZARDO, 2016).

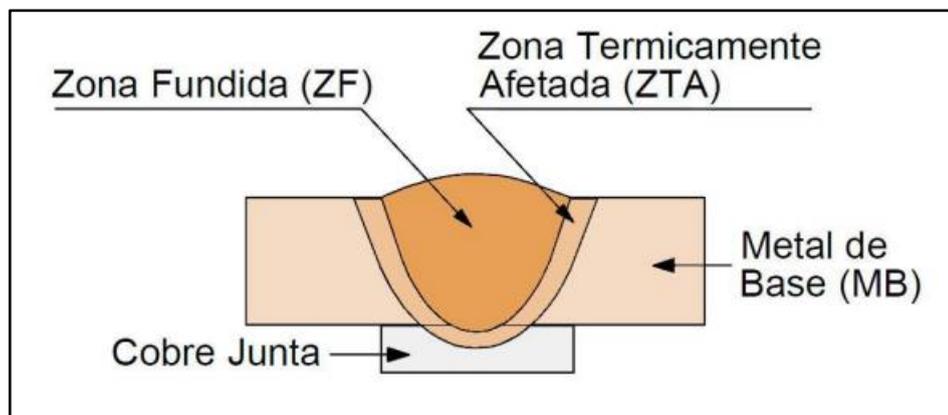
2.1.2 Terminologia das regiões de solda

Há um número enorme de específicos termos para definir o formato e as características técnicas dos cordões de solda (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011). A Figura 1 ilustra esquematicamente uma seção de solda de topo com regiões nomeadas.

Figura 1 - Regiões solda de topo

Fonte: UNISANTA (2023)

A Figura 2 ilustra uma seção transversal de solda e suas regiões. A Zona Fundida (ZF) representa a coalescência entre o Metal de Base (MB) e o metal de adição. Ao lado da ZF há uma região muito discutida em soldagem, a zona termicamente afetada (ZTA). Abaixo, eventualmente se utiliza de um aparato chamado mata junta ou cobre junta, a função dele é conter o material fundido impedindo que a raiz da solda seja prejudicada (UNISANTA, 2023)

Figura 2 - Seção transversal de uma solda de topo

Fonte: UNISANTA (2023)

2.1.2.1 Característica principal da Zona Fundida (ZF) - Diluição

Em Processos de Soldagem por fusão, a ZF pode ser formada sob as mais variadas condições. No caso de soldagem a arco, o metal de adição é transferido ao metal de base na forma de gotas em temperaturas superiores a 2000 °C, se tratando de aços. A formação da ZF depende inteiramente da intensidade dessa transferência,

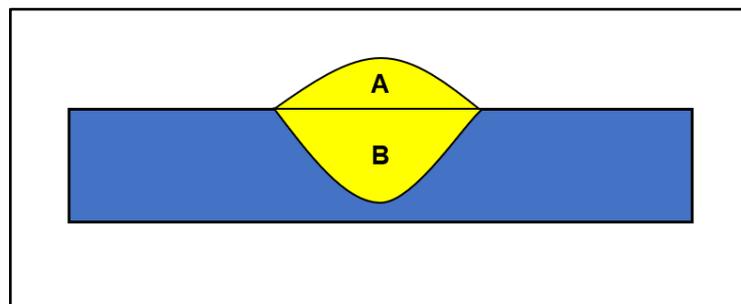
da composição química do MB e do metal de adição e da participação relativa deles. Essa participação relativa é chamada de diluição que pode ser calculada conforme a Equação 1 (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

A Figura 3, ajuda a ilustrar como a diluição pode ser medida através de macrografias de seção transversal.

$$d(\%) = \frac{B}{(A+B)} \times 100$$

Eq. 1

Figura 3 - Representação da medida da diluição em seção transversal de um cordão de solda



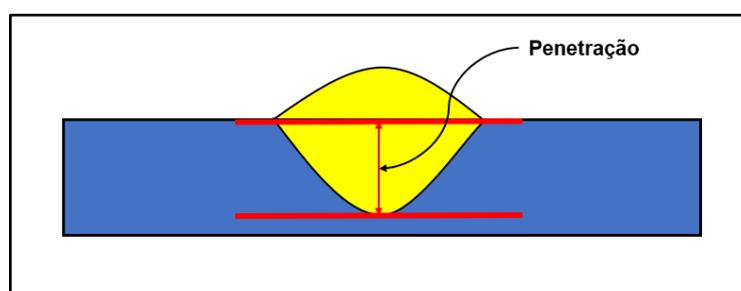
Fonte: Autor (2023)

O controle da diluição é muito importante uma vez que, em certas aplicações especiais ela pode determinar a performance de um componente e pode inclusive favorecer falhas (ZEEMANN, 2003).

2.1.2.2 Penetração / Penetração da junta

Também conhecida como profundidade de fusão, a penetração é a distância que se tem da superfície do MB até a região onde termina a fusão (MARÇAL; SPOLZINO, 2022). A Figura 4 ilustra melhor a definição citada acima.

Figura 4 - Exemplificação esquemática da penetração de solda



Fonte: Autor (2023)

A corrente de soldagem influencia diretamente na penetração. Se a corrente é muito alta ocorrerá o excesso de penetração e isso pode furar ou vazar o MB (ARAÚJO, 2006).

Um outro fator importante que influencia na penetração, se tratando principalmente de soldagem por arco submerso, é a velocidade de soldagem uma vez que, ela está diretamente ligada com a corrente. Velocidades altas tendem a gerar problemas como, mordeduras, porosidade, trinca e cordões não uniformes. Velocidades baixas produzem cordões muito largos, propícios a trincas e com inclusão de escória (ARAÚJO, 2006).

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Dentre os mais de 70 processos de soldagem existentes no mundo (NAZARÉ, 2022), o que mais se destaca é o por fusão onde o Arco Submerso se encaixa.

O Quadro 1 mostra alguns Processos de Soldagem por Fusão e frisa alguns pontos importantes.

Quadro 1 - Processos de Soldagem por Fusão

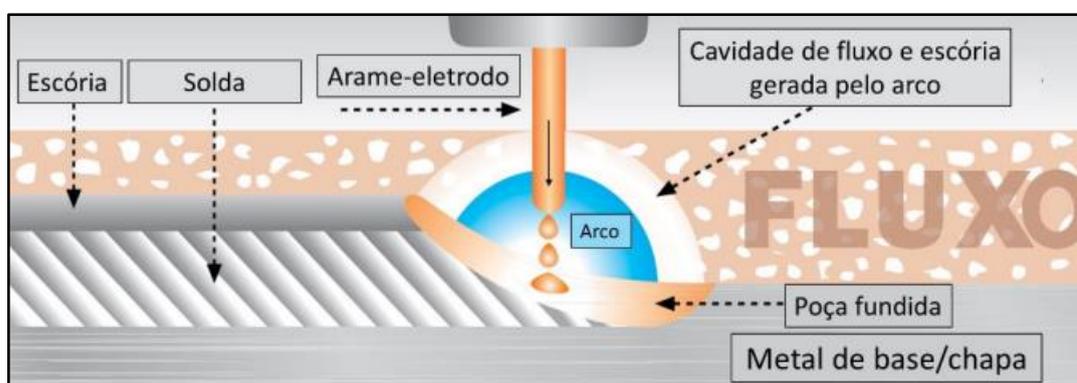
PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por Eletroescória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou Alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco.	Soldagem de aços carbono baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou Alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral CO_2	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semiautomático	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas.
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O_2 , Argônio + CO_2 , CO_2	Automática/Mecanizada ou semiautomática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas e etc. Qualquer posição.
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é contrito por um bocal.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5mm. Passes de raiz.
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou Alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou mistura destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O Arame é adicionado separadamente.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações.
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ($>10^{-4}$ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como a acima.	Como acima. Corte de materiais não metálicos.
Soldagem a Gás	Chama oxiacetilênica		Gás (CO , H_2 , CO_2 , H_2O)	Manual. Arame adicionado separadamente.	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pn e bronze. Soldagem de chapas final e tubos de pequeno diâmetro.

Fonte: Adaptado Modenesi, Marques e Bracarense (2011)

2.3 SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO

A soldagem por arco submerso (*Submerged Arc Welding – SAW*) é um processo em que a união de metais é conseguida através do aquecimento e fusão destes por meio de um arco elétrico formado em um eletrodo sólido e um material base. Neste processo, o arco formado não é visível como em outros processos de soldagem, uma vez que, o arco é submerso a uma camada de fluxo que protege a poça de fusão de agentes contaminantes, formando em seguida, uma camada sólida de escória (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011). A Figura 5, mostra um esquema do processo por Arco Submerso.

Figura 5 - Esquema Soldagem SAW



Fonte: (MENDES, 2022)

A soldagem por arco submerso é um processo estável e suave, de alta produtividade. Gera pouquíssimos fumos de soldagem e respingos, os cordões obtidos possuem bom acabamento e a união gerada entre metal de solda e material base é brando (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011). No SAW as perdas de calor para o meio são baixíssimas, o que torna este processo o mais eficiente termicamente quando comparado a outros processos (TWI, 2020).

Uma das grandes limitações deste processo é quanto a posição de soldagem, sendo possível apenas na posição plana e horizontal, isso porque, o processo utiliza alta intensidade de corrente, tipicamente entre 400 e 1200 Ampères, o volume da poça de fusão é grande e o metal líquido pode escorrer. Além é claro, do fluxo, que é granular (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

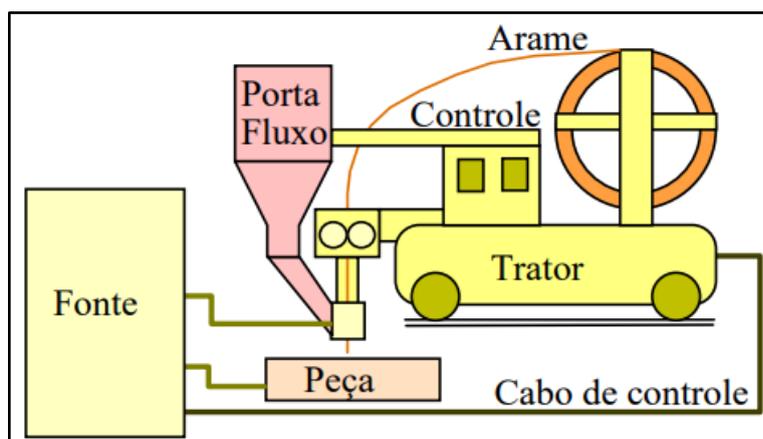
Outro ponto importante a mencionar, conforme mostra a figura 5, é a cavidade de fluxo e escória gerada pelo arco. Dentro dessa cavidade é onde ocorre a

transferência metálica, que segundo Mendes (2022) essa cavidade é responsável por uma transferência metálica estável e sem respingos ainda que se utilize de correntes altas. Ainda segundo Mendes, a transferência metálica pode ser por voo livre ou guiada por escória. A guiada por escória é a mais comum.

2.3.1 Equipamento

O equipamento básico para funcionamento do processo de soldagem por arco submerso, consiste em uma fonte de energia, tocha de soldagem, alimentador de arame, sistema de controle, dispositivo de alimentação do fluxo e cabos elétricos, como mostra a Figura 6. Normalmente, para SAW automático, todo equipamento mencionado acima é montado em um cabeçote de soldagem. (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

Figura 6 - Representação de um equipamento SAW



Fonte: (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011)

A função da fonte é transformar a energia vinda da rede elétrica em um formato adequado para a soldagem (alta corrente e baixa tensão). A fonte pode ser tipo transformadora ou retificadora, corrente/tensão constante e CC/CA. O arame parte de um carretel, é desbobinado e alimentado por um sistema de motor e roletes com velocidade controlada de giro. O porta fluxo reserva o fluxo, este desce de maneira gradual até a região a ser soldada, geralmente por gravidade. A tocha faz contato elétrico com o arame, conduz o mesmo e o fluxo até a região a ser soldada. (MENDES, 2022). O sistema de controle, permite controlar diversos parâmetros de soldagem,

como: velocidade, corrente, tensão. Os cabos elétricos conduzem a energia e devem ter diâmetro adequado a corrente utilizada. O cabeçote de soldagem automático, normalmente utilizado, também é conhecido como “tartaruga”, é um carrinho que se movimenta com velocidade controlada e ajustável por cima de um par de trilhos (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

2.3.2 Consumíveis

Os eletrodos e o fluxo são os consumíveis usados na soldagem por arco submerso. A combinação destes dois junto com o material de base e o procedimento de soldagem, determinam a qualidade do cordão de solda e suas propriedades mecânicas (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

2.3.2.1 Fluxos

Os fluxos utilizados na soldagem por arco submerso são minerais fundíveis granulares, contendo óxidos de manganês, silício, titânio, alumínio, cálcio, zircônio, magnésio e outros compostos como o fluoreto de cálcio (TWI, 2020).

As principais funções do fluxo no processo são estabilizar o arco, fornecer elementos de liga para o metal de solda, proteger o arco contra agentes contaminantes etc. (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

De acordo com a TWI (2020), o fluxo é especialmente formulado para ser compatível com um certo tipo de eletrodo, de modo que essa compatibilidade produza boas e adequadas propriedades mecânicas. Os principais fluxos são:

- Aglomerado – produzidos por meio da secagem dos ingredientes e que em seguida liga-os com compostos de baixo ponto de fusão, como o silicato de sódio. Muitos fluxos ligados têm em sua formulação desoxidantes metálicos que auxiliam na prevenção de poros.
- Fundidos – produzido através da mistura de ingredientes, em seguida esses ingredientes são fundidos até formar um produto homogêneo. É resfriado e moído. Esse tipo de fluxo, promove boa estabilidade do arco e propriedades mecânicas bem definidas do cordão de solda.

Modenesi *et al.* (2011), considera que os fluxos aglomerados, são os mais

utilizados no Brasil.

2.3.2.2 Eletrodos

Os eletrodos podem ser arames sólidos, tubulares ou fitas e são oferecidos na forma de bobinas em diferentes tamanhos e quantidades (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011). Os arames-eletrodo são fabricados por trefilação e tem revestimento cobreado que o protege contra a oxidação.

Os eletrodos são classificados segundo o seu teor de manganês, que pode ser baixo (L), médio (M) e alto (H). Cada grupo apresenta também, quantidades diferentes de carbono e silício que também podem ser de teor baixo ou alto (SENAI, 1997). Geralmente os eletrodos com alto teor de manganês, carbono e silício dão origem a cordões de solda com mais resistência e dureza. O silício é um agente na poça de fusão que a torna mais fluida e melhora o formato dos cordões depositados sob alta corrente ou velocidade de soldagem (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

A AWS possui duas normas importantes relacionadas aos consumíveis do Arco Submerso, a AWS 5. 17-80 diz respeito a arames de baixo teor de carbono e fluxos e a AWS 5. 23-80 diz respeito a aços baixa liga e fluxos. Tanto uma especificação quanto a outra faz a combinação de um fluxo com um determinado eletrodo (SENAI, 1997).

2.3.3 Variações do Processo

Modenesi *et al.* (2011) diz que, o processo de soldagem por arco submerso, a fim de, aumentar produtividade e facilitar algumas aplicações específicas admite diversas variações, tais como:

- Soldagem com arames múltiplos ou *tandem arc*, quando o arranjo de até 6 arames formam arcos distintos. O uso dessa variação aumenta a taxa de deposição por exemplo;
- Soldagem com elevado *stickout*, quando o aumento da taxa de deposição é conseguido através da variação de corrente;
- Soldagem com chanfro estreito ou *narrow-gap*, utiliza de cabeçotes especiais. Permite a soldagem de peças espessas, mas com pequena

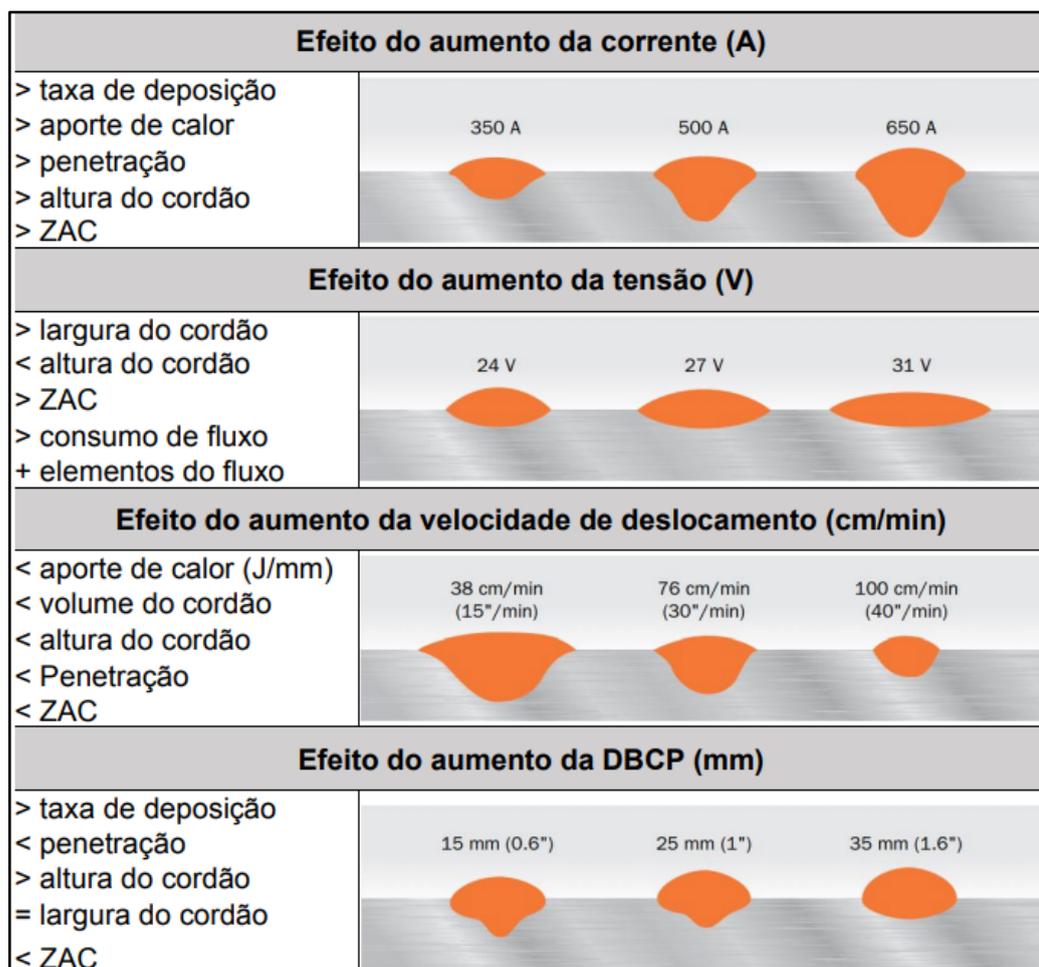
abertura de raiz;

- Soldagem com eletrodo em fita, muito utilizado em operações de revestimento; e
- Soldagem com adição de pó metálico ao fluxo, útil para aumentar a taxa de deposição, geralmente usados no enchimento de chanfros.

2.3.2 Parâmetros de soldagem

Os principais parâmetros de soldagem por arco submerso, são corrente (A) ou velocidade de alimentação do arame (m/min), tensão, velocidade de deslocamento (cm/min) e a distância entre o bico de contato e a peça – DBPC (mm). Abaixo, a Figura 7 mostra o efeito isolado das principais variações de parâmetros da soldagem por arco submerso (MENDES, 2022).

Figura 7 - Efeito isolado das principais variações de parâmetros da soldagem por arco submerso



Fonte: (MENDES, 2022)

2.4 ADIÇÃO DE PÓ METÁLICO NO PROCESSO

Econômico, o arco submerso se destaca por essa característica, porém, o fator produtividade é um objetivo de constante evolução. Não basta apenas aumentar a corrente para ganhar em produção, esse aumento pode trazer diversos problemas quanto o aumento excessivo da diluição, uma ZTA muito grande e a redução de propriedades mecânicas (BUTTIGNON, 2001).

Buttignon (2001) fala de um método alternativo para ganhar em produtividade sem que haja problemas. Esse método consiste na adição de pó metálico ao processo. A adição de pó metálico pode ir a frente do fluxo, adição através do arame ou adição do pó ao fluxo (mistura).

Citações feitas por Modenesi *et al.* (2011), mencionam que a adição de pó metálico ao processo fornece fusão suave, a visual do corão de solda é melhorado e tem-se melhor controle de penetração e diluição. Segundo Buttignon (2001), alguns autores utilizam da técnica do pó para reduzir o aporte térmico na soldagem pelo processo de arco submerso.

2.5 MICROCONSTITUINTES DA SOLDA

De acordo com Araújo (2006), o cordão de solda ou ZF, apresenta uma microestrutura complexa, com diversas morfologias e fases. Essa região pode ser subdividida em 3 zonas, são elas:

- Não afetada termicamente (MB) – apresenta microestrutura Ferrítica e Perlítica se tratando de um aço comum baixo carbono;
- Afetada termicamente (ZTA) – alteração da microestrutura do MB pelo ciclo térmico da soldagem. A energia empregada é suficiente para promover a Austenitização e a dissolução de fase, e favorecer o crescimento de grão. Após resfriamento, a Austenita dessa região pode se transformar em Ferrita não poligonal, Bainita e Martensita;
- Zona de fusão – é o volume da fundição entre o MB e o metal de adição. Essa região durante a soldagem fica invólucra a uma camada vítrea produzida pela fusão de compostos existentes em um fluxo. O fluxo pode interferir no processo de solidificação através da adição de inoculantes

favorecedores de nucleação de fases, como por exemplo a Ferrita Acicular.

Araújo (2006) continua e diz que, a microestrutura da solda é principalmente controlada pela composição química e a taxa de resfriamento. Adicionar elementos de liga também influencia na microestrutura.

2.6 ÓXIDO DE TITÂNIO

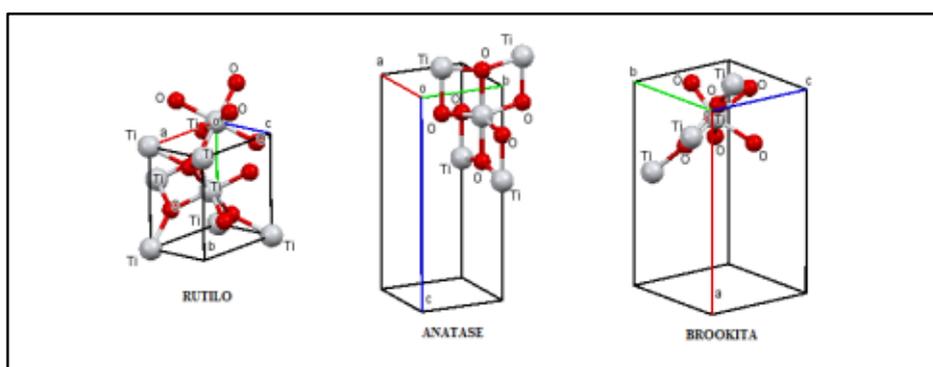
De acordo com D'Alesio (2013), o dióxido de titânio (TiO_2) também conhecido como óxido de titânio ou titânia, é um material que tem aplicações diversas. É um óxido de cor branca, inerte, não tóxico, é de fácil preparação e de baixo custo.

Como mencionado, a fórmula química do óxido de titânio é TiO_2 que consiste em um átomo de titânio e dois de oxigênio (MARÇAL; SPOLZINO, 2022).

Algumas aplicações do TiO_2 incluem degradação de compostos orgânicos, é aplicado como agente de fotocatalise heterogênea no tratamento de efluentes, na purificação da água, em escovas de dente como agente antimicrobiano, em cerâmicas sanitárias, e tintas. Em algumas outras aplicações avançadas se destacam, o uso em sensores de gases, em baterias de lítio, recobrimento anticorrosivo e outros (D'ALESIO, 2013).

O TiO_2 cristaliza em três principais estruturas diferentes: rutilo (tetragonal), anatase (tetragonal), e brookita (ortorrômbica), Figura 8 (D'ALESIO, 2013).

Figura 8 - Estruturas Cristalinas do óxido de titânio



Fonte: (D'ALESIO, 2013)

A Tabela 1 informa a densidade das fases principais do TiO_2 .

Tabela 1 - Densidade das fases do TiO_2

FASE	RUTILO	ANATASE	BROOKITA
Densidade (g/cm^3)	4,23 – 5,5	3,82 – 3,97	4,08 – 4,18

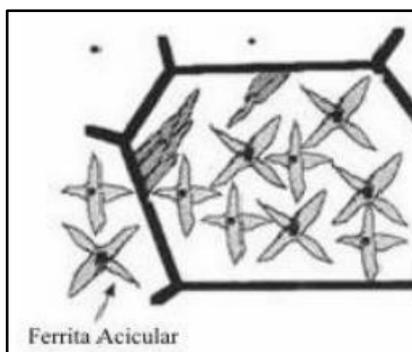
Fonte: Adaptado D'Alesio (2013)

2.6.1 Óxido de Titânio na Soldagem

Para Buttignon (2001) e Araújo (2006), o óxido de titânio é um efetivo nucleador de Ferrita Acicular.

Araújo (2006) explica que, a Ferrita Acicular é o resultado do cisalhamento da matriz da Austenita pela difusão do carbono para a Austenita remanescente. A Figura 9 ilustra esquematicamente a Ferrita Acicular.

Figura 9 - Representação esquemática da Ferrita Acicular



Fonte: Adaptado Araújo (2006)

2.7 AÇO ASTM A 36

Mendes (2014) diz que, o aço ASTM A 36 é fácil de ser encontrado e é muito utilizado por ser barato e possuir boas propriedades mecânicas. É um aço leve e com baixo teor de carbono usado principalmente em estruturas.

Por ser de baixo teor de carbono, até 0,3%, o A 36 é facilmente usinado, forjado e soldado (BATISTA; SANTANA, 2022). Além do teor de carbono próximo a 0,3% o A 36 possui pequenas porcentagens de outros elementos que inclui, manganês, enxofre, fósforo e silício como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição Química Teórica ASTM A 36

Elementos	%
Carbono (C)	0.25-0.29
Cobre (CU)	0.20
Ferro (Fe)	98.0
Manganês (Mn)	1.03
Fósforo (P)	0.040
Silício (Si)	0.280
Enxofre (S)	0.050

Fonte: Adaptado Batista e Santana (2022)

2.7.1 Propriedades Físicas

A densidade do A 36 é de aproximadamente $7,85 \text{ g/cm}^3$ e ponto de fusão está entre as temperaturas de 1425 e 1538°C (BATISTA; SANTANA, 2022).

2.7.2 Propriedades Mecânicas

De acordo com Luz (2017), o A 36 possui propriedades mecânicas bem delimitadas, sendo:

- Limite de escoamento: mínimo 250 MPa ;
- Resistência a tração: entre 400 e 550 MPa ;
- Módulo de elasticidade: 200 GPa ;
- Coeficiente de Poisson: $0,26$;
- Dureza: entre 130 e 150 HB ; e
- Impacto: 27J a -20°C .

2.7.3 Outras características do ASTM A 36

Luz (2017) continua e diz que, o A 36 suporta os seguintes tratamentos térmicos:

- Normalização: entre 899 e 954°C ;
- Recozimento: entre 843 e 871°C ; e
- Alívio de Tensões: entre 677 e 927°C .

2.8 METALOGRAFIA

Metalografia, é o estudo das estruturas dos metais e suas ligas. É a relação íntima do metal com suas propriedades físicas, com o processo de produção, desempenho e outros (ROHDE, 2010).

Para a realização desse estudo é necessário que se tenha um corpo de prova que será posteriormente cortado, lixado, polido e atacado com reagentes químicos (METALURGISTA, 2012).

Rohde (2010) diz que, o ensaio metalográfico pode ser dividido em ensaio macrográfico ou macrografia e ensaio micrográfico ou micrografia.

2.8.1 Macrografia

Exame a olho nu ou com pouca ampliação (até 50x). A Macrografia revela uma ideia de conjunto, referente a homogeneidade do material, a distribuição e natureza de falhas, possível problema com processo produtivo, qualidade de solda etc. (ROHDE, 2010).

2.8.2 Micrografia

É o estudo metalúrgico do metal utilizando um microscópio, é visível a partir de 40x até 1000x (METALURGISTA, 2012). Com a micrografia pode-se observar as fases do material, granulação, teor aproximado de carbono no caso de aços, quantidade de microconstituintes, inclusões etc. (ROHDE, 2010).

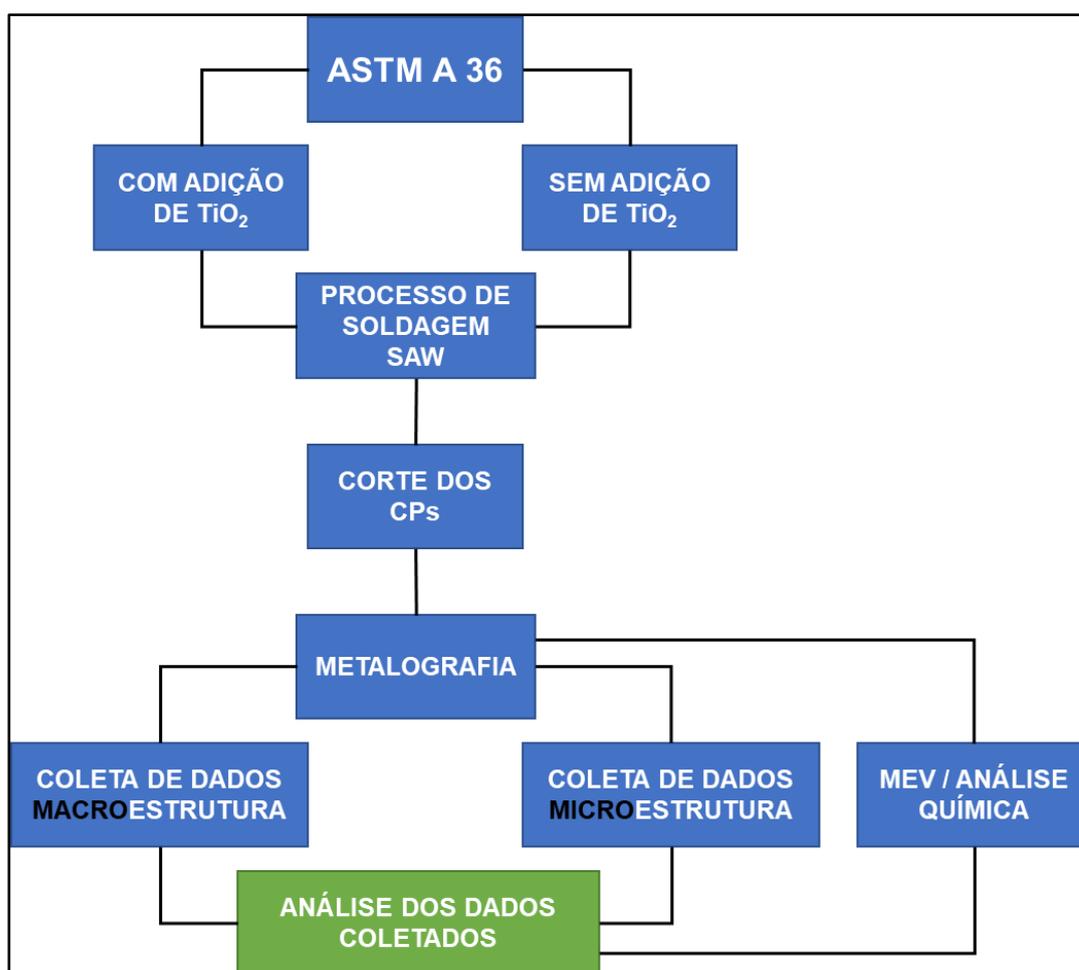
2.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

Para Silva (2020), o MEV analisa pequenos detalhes estruturais. No MEV a área a ser estudada é irradiada por feixes de elétrons, essa interação causa a radiação, o que resulta em imagens que fornecerão dados sobre aquela área. O MEV é um equipamento que pode sofrer *upgrades*, nele pode ser instalado câmeras de captação de raios-X que permitirão, principalmente, realizar análises químicas. Para esse upgrade, dá-se o nome de EDS.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido nas dependências da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba (Fatec). Utilizou-se dos laboratórios de Soldagem, Metalografia, Química e Informática. O ensaio no MEV e a Análise Química (EDS) foram realizados nas dependências da Universidade de Engenharia de Lorena (UEL – USP). A Figura 10 mostra o fluxograma das atividades.

Figura 10 - Fluxograma de atividades



Fonte: Autor (2023)

3.1 CHAPA DE AÇO ASTM A 36

Para a realização do trabalho foram utilizadas 3 chapas idênticas de aço ASTM A 36 nas dimensões 100mm x 200mm x 12,7mm. A Tabela 3 e 4 informam a composição química e um descritivo das condições em que foram submetidas cada chapa, respectivamente.

Tabela 3 - Composição química das chapas (ASTM A 36)

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%
0,14	0,13	0,67	0,02	0,02	0,16

Fonte: Adaptado Batista e Santana (2022)

Tabela 4 - Descritivo de condições

CHAPA	CONDIÇÃO
01	Sem adição de Óxido de Titânio
02	Adição de Óxido de Titânio na superfície
03	Adição de Óxido de Titânio no fluxo

Fonte: Autor (2023)

Ambas as chapas tiveram sua superfície preparadas através de lixamento com uma lixadeira rotativa, Figura 11.

Figura 11 - Chapas 01, 02 e 03

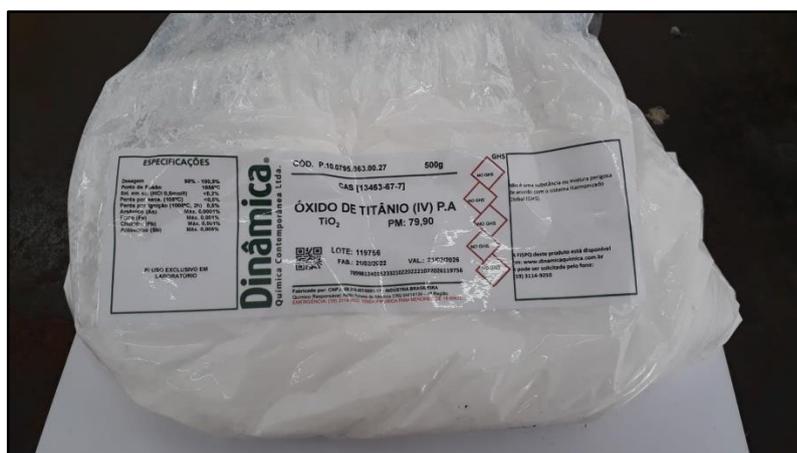


Fonte: Autor (2023)

3.2 ÓXIDO DE TITÂNIO

O óxido de titânio (TiO_2) utilizado Figura 12, é da empresa Dinâmica Química Contemporânea LTDA.

Figura 12 - Óxido de Titânio (TiO_2)



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 5 traz as especificações do fabricante do TiO_2 .

Tabela 5 - Especificação do fabricante

ESPECIFICAÇÕES	
Dosagem	98% - 100,5%
Ponto de Fusão	1855°C
Arsênio (As)	Máx. 0,0001%
Ferro (Fe)	Máx. 0,001%
Chumbo (Pb)	Máx. 0,001%
Antimônio (Sb)	Máx. 0,005%

Fonte: Autor (2023)

3.3 EQUIPAMENTO DE ARCO SUBMERSO

A Figura 13 mostra o equipamento de soldagem a arco submerso do laboratório da Fatec Pinda utilizado no projeto. O equipamento utiliza uma fonte IdeaLarc DC 1000 e trator da empresa Lincoln Electric. Utilizou-se o arame EL 12 referenciado na norma AWS A5.17 – 97 (R 2007) e o fluxo ligado LN 35 usado para ligas de baixo Cromo e Manganês.

Figura 13 - Equipamento de soldagem por arco submerso



Fonte: Autor (2023)

3.3.1 – Parâmetros de Soldagem

A tabela 6 mostra os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 6 - Parâmetros de Soldagem

Parâmetros de Soldagem	
Voltagem (V)	29
Amperagem (A)	500
Velocidade de soldagem (cm/min)	36
Posição de soldagem	1F
Distância bico de contato (mm)	25
Diâmetro do arame (mm)	2,38
Arame	EL 12
Fluxo	LN 35

Fonte: Autor (2023)

3.4 ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA (CP)

3.4.1 Procedimento de corte

Utilizando-se de uma cortadeira de bancada (Figura 14) do Laboratório de Metalografia, as chapas, após serem submetidas ao processo de soldagem foram seccionadas (cortadas) em partes menores para serem analisadas macro e micro estruturalmente.

Figura 14 - Cortadeira de bancada



Fonte: Autor (2023)

A cortadeira modelo CM 80 da empresa Teclago utiliza discos de corte abrasivos de intensa refrigeração, o disco empregado foi o TCM 3, é um disco fino, normalmente feito de oxido de silicato agregado a um tipo de borracha.

Após a etapa de corte, as secções menores das chapas receberam nova identificação (CP) como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Renomeação das chapas após corte

SECÇÃO MENOR DA CHAPA	CORPO DE PROVA
01	CP 01
02	CP 02
03	CP 03

Fonte: Autor (2023)

3.4.2 Preparação dos Corpos de Prova

Para que a macroestrutura e microestrutura dos corpos de prova sejam analisadas, necessita-se passar por um processo de lixamento. Esta é uma etapa de extrema importância, é demorada, exige paciência e uma certa habilidade do preparador.

O objetivo do lixamento é eliminar riscos, marcas, oriundos principalmente do processo de corte. O lixamento garante ótimo acabamento.

Para que a superfície da amostra fique uniforme e sem riscos e marcas, uma sequência de lixas de variadas granulações são utilizadas. Abaixo, a sequência lixas utilizadas:

- Lixa 180;
- Lixa 200;
- Lixa 400;
- Lixa 600;
- Lixa 1200; e
- Lixa 2000.

O lixamento é feito manualmente, e a cada troca de lixa a amostra deve ser perpendicularmente mudada de posição (90°) até que as imperfeições sejam eliminadas.

Utilizou-se dois equipamentos diferentes (ambos refrigerados a água) para efetuar o processo. Para deixar uma superfície em condições de análise macroestrutural foi utilizado a lixadeira de pistas (Figura 15) com lixas de 180 a 600. E para análise microestrutural foi utilizada lixadeira circular automática (Figura 16) com lixas partindo de 600 até 2000.

Figura 15 - Lixadeira de pistas



Fonte: Autor (2023)

Figura 16 - Lixadeira circular automática



Fonte: Autor (2023)

3.4.3 Polimento dos Corpos de Prova

O polimento é uma operação posterior ao lixamento e garante a superfície adequada para a análise microestrutural.

Utiliza-se para este processo abrasivos de diamante e ou alumina. Antes de efetuar a operação, com o auxílio de um algodão e água corrente a superfície de cada CP deve ser limpa.

Os abrasivos utilizados foram a pasta de diamante com uma granulação de 3μ e em seguida a pasta de sílica com granulação de $0,05\mu$. O equipamento utilizado foi uma politriz circular (Figura 17).

Figura 17 - Politriz circular; politriz da direita (pasta de diamante); politriz da esquerda (pasta de sílica)



Fonte: Autor (2023)

3.4.4 Ataque Químico

O último processo para que macro e micro estruturalmente o material proposto seja de fato analisada, é a efetuação do ataque químico. Neste caso, utilizou-se de NITAL 10% para revelação macro dos CPs, e NITAL 2% para revelação micro.

NITAL é uma solução de ácido nítrico e álcool etílico. Por questões de segurança, uma vez que se manipulava ácido, todo processo foi feito dentro de uma capela de exaustão (Figura 18). A técnica utilizada de ataque foi por imersão, onde a superfície da amostra ficou mergulhada em ácido por aproximadamente 10 segundos. Passado o tempo mencionado, rapidamente e com cuidado, os CPs foram lavados com água destilada e em seguida, uma fina camada de álcool foi despejada para auxiliar na secagem com o secador.

Figura 18 - Capela de exaustão

Fonte: Autor (2023)

3.4.5 Microscopia Óptica

Após o processo de lixamento e polimento, com o auxílio de um microscópio óptico de alta resolução da empresa Olympus modelo CX 31 e um computador munido do *software Image Analysis* (Figura 19), foram tiradas fotos da macroestrutura e microestrutura em ampliações que variaram de 50x a 1000x.

Figura 19 - Computador processando imagem através do Image Analysis / Microscópio Óptico Olympus CX 31

Fonte: Autor (2023)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após todas as etapas mencionadas no item anterior, é chegado o momento de analisar os resultados obtidos. Abaixo a Figura 20 detalha o sequenciamento do processo, destacando as chapas logo após o processo de soldagem por arco submerso, seguido dos cortes para obtenção dos corpos de prova.

Figura 20 - Sequência de processo



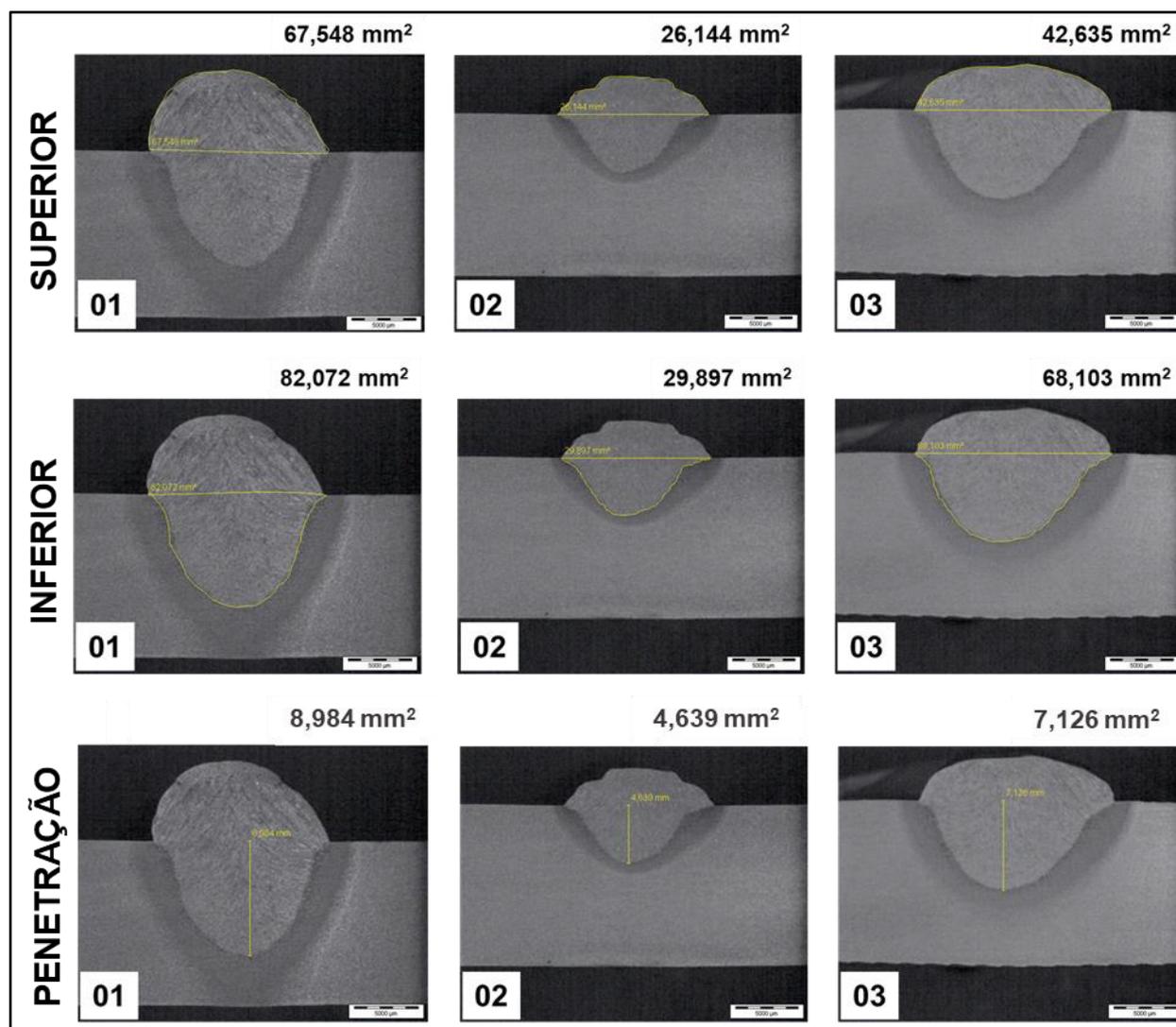
Fonte: Autor (2023)

4.1 ANÁLISE METALGRÁFICA

4.1.1 Macrografia

A Figura 21 mostra o compilado de macrografias com as medidas da área superior, inferior e penetração de solda dos CPs 01, 02 e 03 respectivamente.

Figura 21 - Macrografias com medidas da área superior, inferior e penetração (Ataque com NITAL 10% / Ampliação 50x)



Fonte: Autor (2023)

Observa-se que os cordões de solda apresentam penetração satisfatória. A menor área e o menor comprimento de penetração são observados no CP 02, em que o óxido de titânio foi colocado sobre a chapa, a frente do arco elétrico. O CP 03 é o que visivelmente apresenta medidas de área e penetração mediana e teve o óxido de titânio misturado ao fluxo. No CP 01 não foi adicionado óxido de titânio, possui as maiores medidas de área e penetração, que quando comparado os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho, com os parâmetros da figura 3 de Mendes (2022), o formato da macrografia da seção transversal real do cordão é muito próximo ao ilustrado.

4.1.1.1 Cálculo da diluição

Seguindo o que disse Modenesi *et al.* (2011), através das macrografias e seus valores é possível calcular a diluição de solda. A Tabela 8 apresenta os resultados calculados.

Tabela 8 - Medição da diluição de solda

	CP 01	CP 02	CP 03
Condição	Sem adição de TiO ₂	Adição de TiO ₂ a frente do arco	Adição de TiO ₂ ao fluxo
Área Sup. (mm²)	67,548	26,144	42,635
Área Inf. (mm²)	82,072	29,897	68,103
Diluição (%)	55	53	61

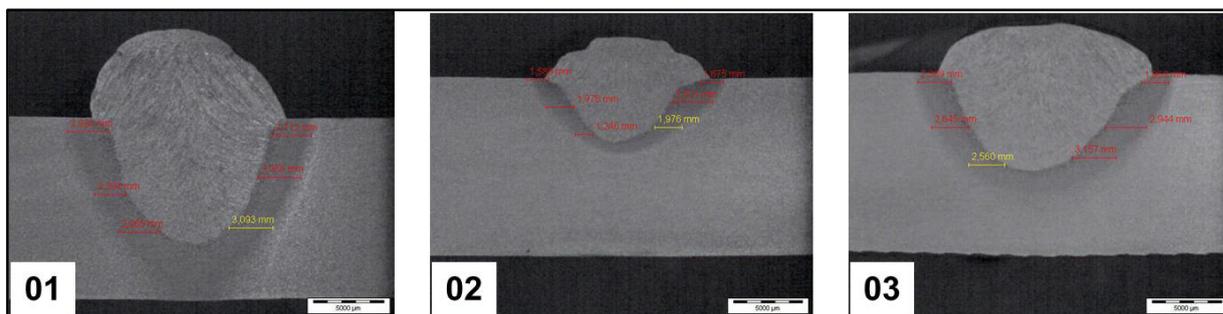
Fonte: Autor (2023)

Observa-se uma sutil diferença de 2% de diluição quando comparado os valores do CP 01 e 02. O aspecto visual do CP 02 é de um cordão de solda menor e mais uniforme quando comparado com os CPs 01 e 03. O CP 03 se destaca com 61% de diluição.

4.1.1.2 Macrografia ZTA

A Figura 22 ilustra a macrografia da ZTA e os valores de 6 pontos de largura.

Figura 22 - Macro ZTA média de pontos. (Ataque com NITAL 10% / Ampliação 50x)



Fonte: Autor (2023)

A tabela 9 traz os valores de largura da ZTA e a média desses.

Tabela 9 - Largura ZTA

Pontos	CP 01	CP 02	CP 03
A (mm)	2,924	1,589	2,389
B (mm)	2,204	1,976	2,645
C (mm)	2,966	1,246	2,56
D (mm)	3,093	1,976	3,157
E (mm)	2,966	2,921	2,944
F (mm)	2,712	1,675	1,963
MÉDIA	2,81	1,89	2,61

Fonte: Autor (2023)

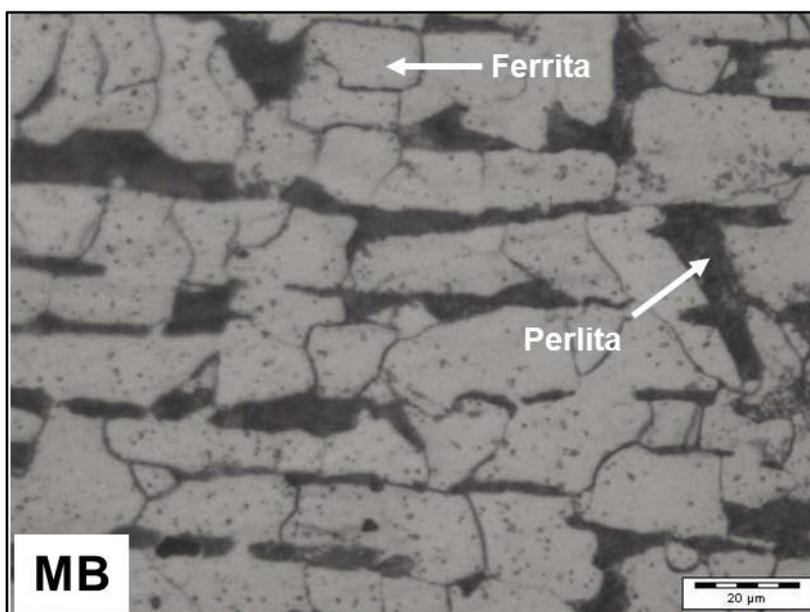
Este ponto apenas reforça o que Buttignon (2001) diz sobre o isolamento da tensão e corrente durante soldagem quando adicionado pó ao processo. A figura 22 deixa claro que a adição de óxido de titânio, quando comparado os CPs 02 e 03 com o CP 01, favoreceu a diminuição da ZTA e penetração. D'Alezio (2013) ainda classifica que um dos polimorfos do TiO_2 é um rutilo. O rutilo é termodinamicamente muito estável, tem alto índice de refração e alta dispersão (UFRGS, 2020).

4.1.2 Micrografia

4.1.2.1 Micrografia do Material Base (MB)

A Figura 23 mostra a micrografia do MB (ASTM A 36). Pode-se observar que a estrutura é característica de aço baixo carbono. Constituído basicamente por Ferrita e Perlita como já demonstrado também por Batista e Santana (2022).

Figura 23 - Micrografia MB (Ataque com NITAL 2% / Ampliação 500x)

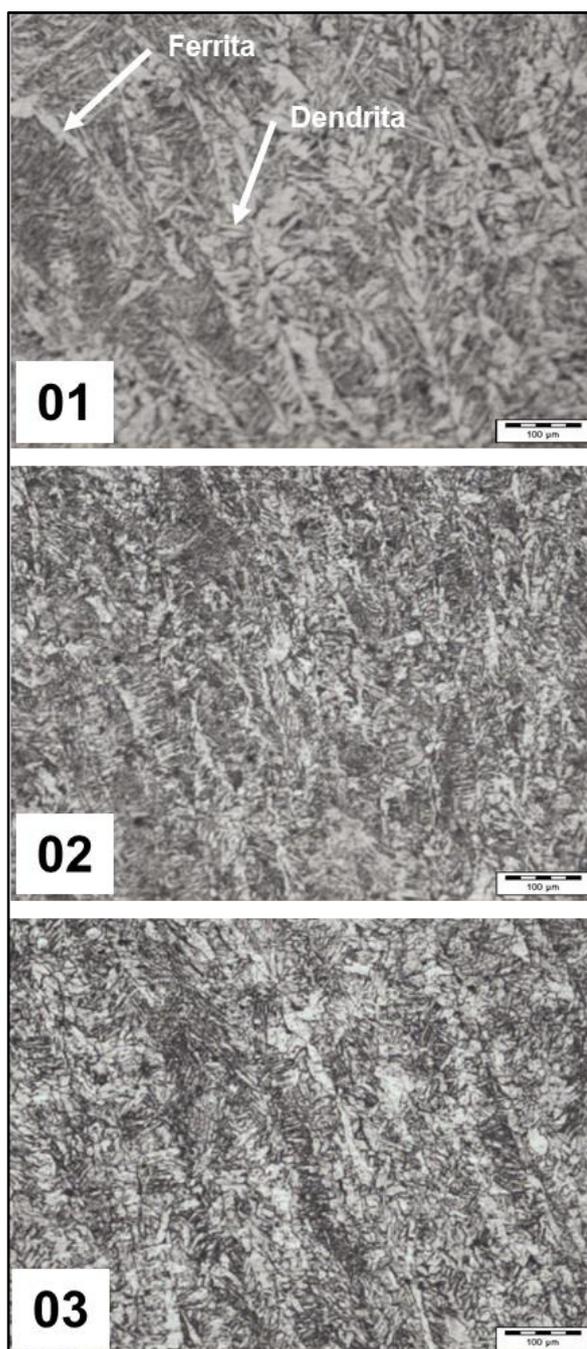


Fonte: Autor (2023)

4.1.2.2 Micrografias zona fundida

A micrografia da ZF de cada CP é apresentada na Figura 24.

Figura 24 - Micrografia ZF (Ataque com NITAL 2% / Ampliação 500x)



Fonte: Autor (2023)

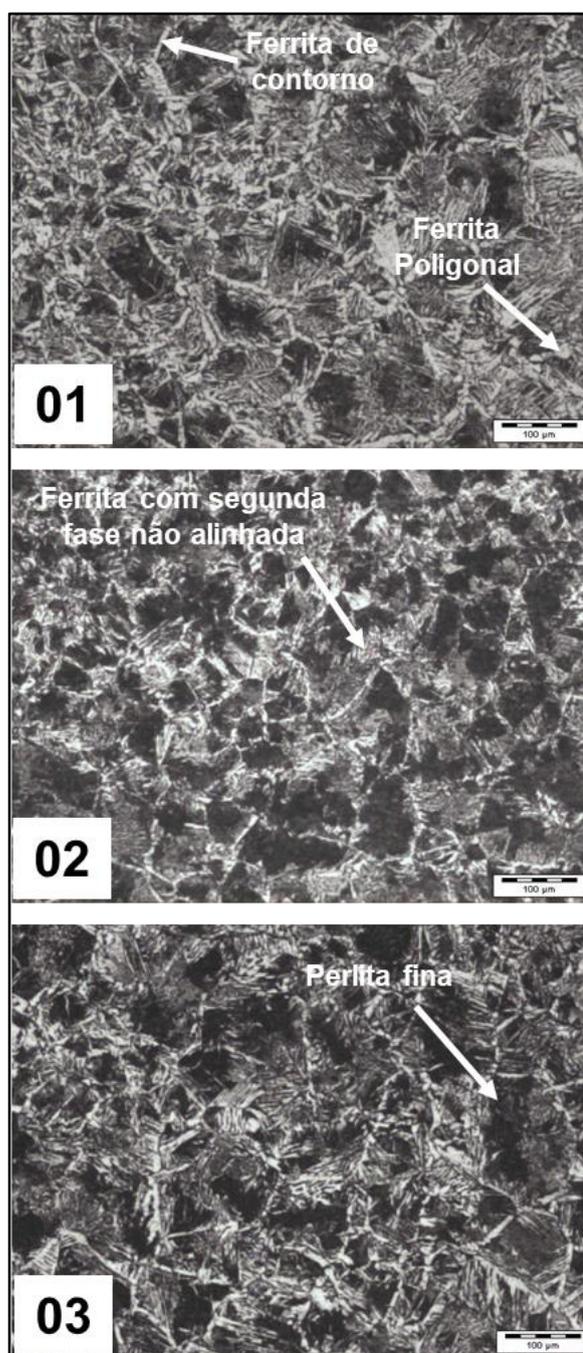
Todos os CPs apresentaram microestruturas parecidas, constituída basicamente de dendrita (ferrita + cementita) (BATISTA; SANTANA, 2020). Um aparecimento ínfimo de ferrita acicular é observada no CP 03. A adição de TiO_2 não

teve influência sobre a microestrutura da zona fundida.

4.1.2.3 Micrografias ZTA

A micrografia da ZTA de cada CP é apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Micrografia ZTA (Ataque com NITAL 2% / Ampliação 500x)



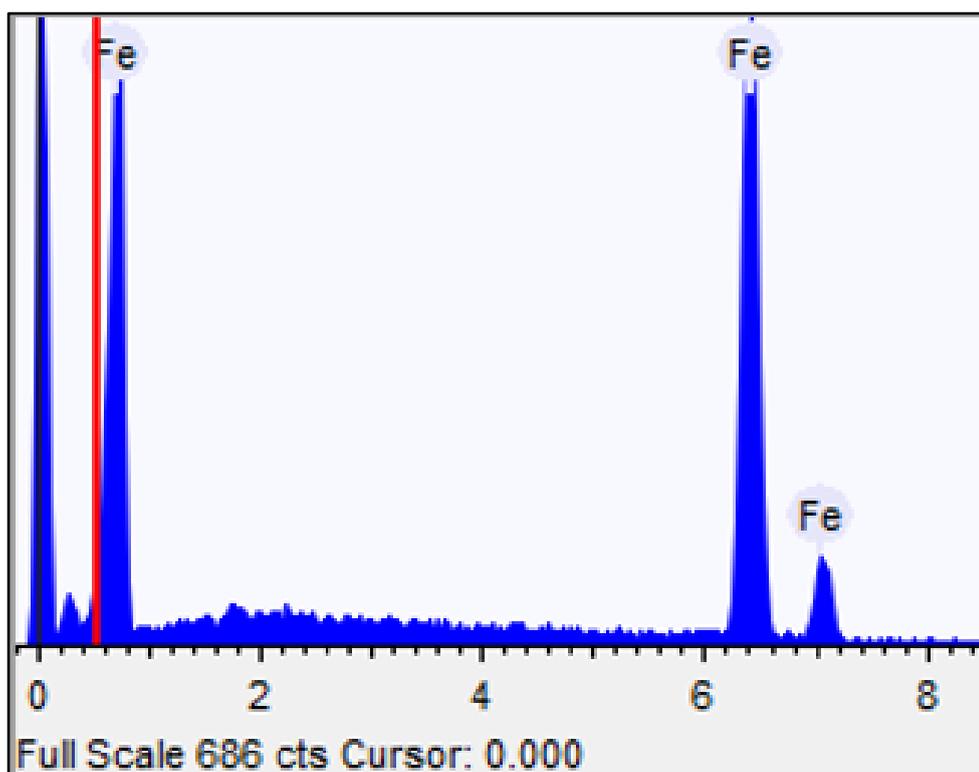
Fonte: Autor (2023)

A TiO_2 também não influenciou a microestrutura da ZTA. Os microconstituintes destacados na figura acima são os mesmos frequentemente observados em soldagem de aço baixo carbono pelo processo SAW. Na literatura se encontra resultados similares como é caso de Batista e Santana (2022) e Marçal e Spolzino (2022), destacando ferrita de contorno, ferrita poligonal, ferrita com segunda fase não alinhada e perlita fina.

4.2 MEV / EDS

O EDS revelou em todos os CPs a presença massiva do elemento Ferro (Fe), como mostra a Figura 26. A adição de TiO_2 nos CPs 02 e 03 não influenciou na composição química.

Figura 26 - Espectro dos CPs



Fonte: Autor (2023)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos experimentos realizados com os Corpos de Prova 01, 02 e 03 e das análises feitas é possível concluir que:

- O CP 01 ao qual não foi adicionado TiO_2 , teve penetração e tamanho da ZTA maiores que os demais CPs. A diluição ficou em 55%;
- O CP 02 teve o TiO_2 adicionado à frente do arco, esse método resultou em um cordão mais assentado, uniforme, suave, com baixa diluição, pouca penetração e menor ZTA;
- O CP 03 teve o TiO_2 misturado ao fluxo (50/50), comparado ao CP 01 ele tem menor penetração e tamanho de ZTA. A diluição do CP 03 é de 61%, maior valor dentre os três;
- A adição de TiO_2 nos CPs 02 e 03 não impactou a microestrutura dos deles, foi observado microconstituintes que já são inerentes ao processo.

Logo, destaca-se como melhor condição o CP 02. A adição de TiO_2 a frente do arco agiu com um isolador de tensão e corrente durante o processo, o que garantiu os melhores resultados.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Comparação entre adição de Óxido de Ferro e Óxido de Titânio;
- Aumento da proporção de Óxido de Titânio ao fluxo;
- Estudo do aporte térmico no processo SAW quando adicionado Óxido de Titânio a frente do arco.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Márcia Regina Vieira de. **Caracterização Microestrutural do Metal de Solda Depositado por Arco Submerso em Chapas de Aço-Carbono Estrutural**. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Unesp, Ilha Solteira, 2006.

BATISTA, Daniel Santana; SANTANA, José Luiz. **A influência da granulometria do fluxo ativo no Processo de Soldagem Arco submerso “SAW” no aço ASTM A36**. 2022. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia Mecânica - Processos de Soldagem., Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, 2022.

BUTTIGNON, Isabel Cristina. **Efeitos do Fluxo Ativado como Recebido na Soldagem a Arco Submerso com Adição de Pó de Ferro**. 2001. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

CUNHA, Tiago Vieira da *et al.* **Avaliação do Uso do Tecimento na Soldagem a Arco Submerso**. Florianópolis: Soldagem & Inspeção, 2018. 10 p. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/YvkF6rnkYgzBgVF38PbNkNt/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 maio 2023.

D`ALESIO, Hugo Alejandro. **Síntese de Óxido de Titânio Nano estruturado**. 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

FARIA, Isabella Cristina Souza *et al.* Evolução dos Processos de Automação em Células de Soldagem: Uma Revisão da Literatura. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 01-16, out. 2021.

FAGUNDES JÚNIOR, José; CARDOSO, Alphonsus Henrique Clemente; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Adição de TiO₂, CaCO₃ e CaF₂ Como Componentes do Fluxo de Arames Tubulares para a Formação de TiC**. Belo Horizonte: Soldagem e Inspeção, 2020.

FELIZARDO, Ivanilza. **Tecnologia da Soldagem**. Belo Horizonte: Cefet-Mg, 2016. Color.

FERRARI, Marcello; NEVES, Mauricio David Martins das; PANÃO, Juliano Neves. **Análise das Propriedades Mecânicas de Juntas de Aço Carbono Estrutural Soldadas pelo Processo Arco Submerso com os Arcos Simples e Duplo (Tandem-Arc)**. São Paulo: Soldagem e Inspeção, 2019. 11 p. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/3SxtYBjdjYbBV4GMThGLYxg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 maio 2023.

LUZ, Gelson. **Aço ASTM A36 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>. Acesso em: 20 maio 2023.

MARÇAL, Igor Silvestre de Lima; SPOLZINO, Luiz Eduardo Cabral de Lemos. **Estudo do Processo de Soldagem por MIG em Material A-36 com Adição de Óxido de Titânio**. 2022. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia Mecânica – Processos de Soldagem, Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, 2022.

MENDES, Naihon Pereira. **Teste de Resistência a Tração de Chapa de Aço ASTM A 36: ensaios com e sem tratamento térmico por alívio de tensão**. 2014. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário Sul de Minas, Varginha, 2014. Disponível em: <http://192.100.247.84/bitstream/prefix/1697/1/Naihon%20Pereira%20Mendes%20154625.pdf>. Acesso em: 08 maio 2023.

MENDES, Newton Sérgio Nascimento. **Manufatura Aditiva por Deposição a Arco em Leito de Fluxo: Prova de Conceito**. 2022. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34086/1/ManufaturaAditivaDeposicao%20a7%20a3o.pdf>. Acesso em: 29 maio 2023.

MOREIRA, Cleo da Luz. **Projeto para Automação de Máquina de Solda Arco Submerso de Dois Cabeçotes**. 2018. 53 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, UNIFACVEST, Lages, 2018. Disponível em: <https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/4de49-tcc-cleo-da-luz-moreira-eng.-mecanica-2018.pdf>. Acesso em: 07 maio 2023.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: Ufmg, 2000. 52 p. Disponível em: https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/0/03/Perguntas_.pdf. Acesso em: 02 maio 2023.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2011. 363p.

NAZARÉ, Vanessa Dias Mendes. **Estudo da Profundidade e Diluição do Aço A36 com a Variação da Inclinação do Ângulo da Tocha no Processo Mig (GMAW)**. 2022. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, 2022.

QUITES, Almir M.; DUTRA, Jair C.. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: Edeme, 1979. 245 p.

ROHDE, Regis Almir. **Metalografia: Preparação de Amostras**. Santo Angêlo: Uri Santo Angêlo, 2010.

SILVA, Luiz Guilherme Cabral e. **Estudo dos Efeitos da Oxidação Eletrolítica a Plasma na liga de Alumínio AA6101 – T6 em solução de Tetraborato de Sódio**. 2020. Trabalho de Graduação do Curso de Tecnologia Mecânica – Processos de Soldagem. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba – São Paulo. 2020.

TWI. **Submerged Arc Welding Process**. 2020. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/submerged-arc-welding-process-005>. Acesso em: 27 maio 2023.

UNISANTA. **Mecânica**. Santos. Disponível em: <https://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/capit5.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

UFRGS. **Rutilo TiO₂**. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/minmicro/Rutilo.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2023.

ZEEMANN, Annelise. **Diluição**. Infosolda, Osasco, v. 1, n. 106, p. 1-4, fev. 2003. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/metal/diluiio.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2023.