



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANA CARLA SANTOS DA SILVA

**APLICABILIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO  
COM MÚLTIPLOS ARAMES E ADIÇÃO DE ARAME FRIO NA SOLDAGEM DO  
AÇO ASTM A572 GR 50**

Recife

2024

ANA CARLA SANTOS DA SILVA

**APLICABILIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO  
COM MÚLTIPLOS ARAMES E ADIÇÃO DE ARAME FRIO NA SOLDAGEM DO  
AÇO ASTM A572 GR 50**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutora em Engenharia Mecânica.

**Área de concentração:** Engenharia de Materiais e Fabricação

**Orientador:** Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos

**Coorientador:** Prof. Dr. Flávio José da Silva

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva, Ana Carla Santos da.

Aplicabilidade do processo de soldagem por arco submerso com múltiplos arames e adição de arame frio na soldagem do aço ASTM A572 Gr 50 / Ana Carla Santos da Silva. - Recife, 2024.

81 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2024.

Orientação: Tiago Felipe de Abreu Santos.

Coorientação: Flávio José da Silva.

1. Tandem Arc; 2. Twin Arc; 3. Arame Frio; 4. Aumento de Produtividade; 5. Múltiplos Arames. I. Santos, Tiago Felipe de Abreu. II. Silva, Flávio José da. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 621

ANA CARLA SANTOS DA SILVA

APLICABILIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO  
SUBMERSO COM MÚLTIPLOS ARAMES E ADIÇÃO DE ARAME  
FRIO NA SOLDAGEM DO AÇO ASTM A572 GR 50

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 20/02/2024

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Flávio José da Silva (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Rodrigo José de Oliveira (Examinador Externo)  
Universidade Estadual da Paraíba

---

Prof. Dr. Renato Alexandre Costa de Santana (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Campina Grande

## RESUMO

O presente trabalho visa estudar o uso das variáveis do processo de soldagem por arco submerso com a utilização de múltiplos arames, com o objetivo de aumentar a produtividade e desenvolver tecnologia para a produção de tubos com finalidade estrutural. Estudos ao redor do mundo têm sido realizados para compreender a interação entre a soldagem e seus efeitos durante a fabricação de tubos, além de buscar o aumento da produtividade. Este estudo propõe avaliar a aplicabilidade das variantes do processo de arco submerso com múltiplos arames, como o tandem arc e o twin arc, com a adição de arame frio. Esta última tecnologia vem sendo explorada nos últimos anos por reduzir o aporte térmico efetivo e melhorar as propriedades mecânicas das juntas soldadas. Além disso, foram identificados os impactos gerados pelo uso da tecnologia de adição de arame frio na poça de fusão. Foram utilizados grupos de amostras para avaliar e gerar conjuntos de parâmetros de análise, sendo três amostras para o tandem arc e seis para o twin arc. A avaliação e análise das juntas foram realizadas por microscopia óptica e eletrônica de varredura, estereoscopia e ensaio de dureza. Os resultados indicam que o uso do arame frio reduz o aporte térmico efetivo, influenciando diretamente na região da Zona Termicamente Afetada (ZTA), diminuindo seu tamanho e refinando os grãos desta região, aumentando a fração volumétrica de ferrita acicular. Em relação aos parâmetros geométricos, é possível afirmar que o uso do arame frio aumenta a taxa de deposição, sem maiores influências nos demais parâmetros. Além disso, pode-se concluir que o uso do tandem arc e do twin arc para chapas de até 16 mm é viável dentro dos limites de velocidades propostos. Por fim, evidenciou-se que, para o aumento da produtividade nas condições pré-definidas neste trabalho, a variável mais adequada é o tandem arc.

**Palavras-chaves:** Tandem Arc. Twin Arc. Arame Frio. Aumento de Produtividade. Múltiplos Arames.

## **ABSTRACT**

The present work aims to study the use of variables in the submerged arc welding process with the use of multiple wires, with the objective of increasing productivity and developing technology to produce tubes for structural purposes. Studies around the world have been conducted to understand the interaction between welding and its effects during tube manufacturing, in addition to seeking increased productivity. This study proposes to evaluate the applicability of submerged arc process variants with multiple wires, such as tandem arc and twin arc, with the addition of cold wire. This latest technology has been explored in recent years for reducing effective heat input and improving the mechanical properties of welded joints. Additionally, the impacts generated using cold wire addition technology in the weld pool were identified. Sample groups were used to evaluate and generate sets of analysis parameters, with three samples for tandem arc and six for twin arc. The evaluation and analysis of the joints were carried out using optical microscopy, scanning electron microscopy, stereoscopy, and hardness testing. The results indicate that the use of cold wire reduces the effective heat input, directly influencing the Heat-Affected Zone (HAZ), reducing its size, refining the grains in this region, and increasing the acicular ferrite volume fraction. Regarding geometric parameters, it is possible to affirm that the use of cold wire increases the deposition rate without significantly influencing other parameters. Furthermore, it can be concluded that the use of tandem arc and twin arc for plates up to 16 mm is feasible within the proposed speed limits. Finally, it was evidenced that, for increasing productivity under the predefined conditions in this work, the most suitable variable is the tandem arc.

**Keywords:** Tandem Arc. Twin Arc. Cold Wire. Productivity Increase. Multiple Wires.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do processo SAW com arame único .....	12
Figura 2 - Comparação esquemática da taxa de deposição para diversas técnicas de soldagem.....	13
Figura 3 – Taxas de deposição típicas das variantes do processo SAW .....	15
Figura 4 - Esquema o sistema tandem-arc com dois e três arames .....	17
Figura 5 – Taxa de deposição em configurações diferentes de <i>tandem</i> .....	18
Figura 6 – Esquema configuração <i>twin arc</i> com dois arames .....	19
Figura 7 - Custos relativos do processo de soldagem com 1, 2 e 3 arames .....	20
Figura 8 - Gráfico de taxa de deposição (a) comparativo de taxa de deposição com um e dois arames (b) comparativo de taxa de deposição com diâmetros de arames diferentes.....	20
Figura 9 - Esquema de configuração com adição de arame frio (a) adição de arame frio em configuração tandem (b) adição de arame frio em configuração <i>twin</i> .....	22
Figura 10 - Fluxograma do procedimento experimental .....	24
Figura 11 - Tocha ICE: a) detalhe da interação entre os arcos; b) detalhe da tocha ICE .....	26
Figura 12 - Equipamento de soldagem <i>twin arc</i> .....	26
Figura 13 - Equipamento de soldagem <i>tandem arc</i> .....	27
Figura 14 - Esquema junta soldada (a) tandem arc (b) twin arc.....	28
Figura 15 - Esquema do arranjo da configuração da tocha em tandem arc: (a) Imagem real da tocha; (b) Esquema com detalhes .....	29
Figura 16 - Esquema de corte para extração de amostras dos cordões de solda.....	30
Figura 17 - Equipamentos utilizados para captura de imagens: Microscópio (a) ótico (MO) (b) eletrônico de varredura (MEV).....	32
Figura 18 - (a) Equipamento de mapeamento de dureza; (b) esquema do mapeamento na secção transversal do cordão de solda .....	33
Figura 19 - Macrografias cordões de solda em tandem arc (a) T160; (b) T140; (c) T120 .....	37
Figura 20 - Macrografias transversais dos cordões das amostras: (a) T120; (b) T140; (c) T160; (d) esquema representativo das medidas da junta, todas as unidades em mm. ....	38

Figura 21 - Área de penetração, área de reforço e diluição, calculadas a partir do perfil das juntas. ....	40
Figura 22 - Valores de diluição por cordão de solda e passe.....	41
Figura 23 - Macrografias cordões de solda em tandem arc (a) I60AF0; (b) I55AF20; (c) I55AF70; (d) I40AF20; (e) I40AF70; (f) I40AF0.....	42
Figura 24 - Gráficos de análise dimensional (a) Penetração versus adição de arame fio (b) Largura versus adição de arame frio.....	44
Figura 25 - Análise dimensional do cordão de solda: (a) coeficiente de diluição (b) área de penetração e área de reforço.....	46
Figura 26 - Macrografias dos cordões de solda com a presença de chanfro.....	49
Figura 27 - Metal de base A572 Gr. 50 (a) Microestrutura do metal de base (b) Fração volumétrica de fases: perlita e ferrita.....	50
Figura 28 - Micrografias da região de transição dos cordões de solda (50×).....	51
Figura 29 - Micrografias da Região de Grãos Grosseiros nas ZTAs (a) T120; (b) T140 e (c) T160.....	54
Figura 30 - Micrografias de T160, após ataque com reagente Le Pera. O ataque realça a distinção entre os constituintes ferríticos e bainíticos. A interface entre ZF e ZTA é vista em (a).....	56
Figura 31 - Imagem de Microscopia eletrônica de varredura evidenciando a presença de bainita na ZTA de T160. (a) Aumento de 5 mil vezes. (b) Aumento de 10 mil vezes.....	57
Figura 32 - Imagens de microscopia óptica – com aumentos de 50 vezes em a, c, e e 200 vezes em b, d, f – das microestruturas de T160 (a, b), T140 (c, d) e T120 (e, f). ....	58
Figura 33 - Microscopia ótica da zona fundida dos cordões twin arc: a) e b) I0V60; c) e d) I20V55; e) e f) I70V55; g) e h) I20V40; i) e j) I70V40; k) e l) I0V40.....	61
Figura 34 - Micrografias da ZTA Região de Grãos Grosseiros (a) I0V60; (b) I20V55; (c) I70V55; (d) I0V40; (e) I20V40 e (g) I70V40.....	64
Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura evidenciando a presença de bainita na ZTA (a) I20V55 (b) I20V40.....	67
Figura 36 - Mapa de dureza dos cordões soldados em tandem arc: T160 e T120 ...	68
Figura 37 - Mapa de dureza dos cordões soldados em twin arc: I20V55 e I70V55...	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química e propriedades mecânicas do metal de base .....	24
Tabela 2 - Composição química e propriedades mecânicas dos consumíveis .....	25
Tabela 3 - Parâmetros de soldagem pelo SAW <i>twin</i> com adição de arame frio.....	28
Tabela 4 - Parâmetros de soldagem para SAW – <i>tandem arc</i> .....	29
Tabela 5 - Ataque químico utilizado na revelação dos microconstituintes .....	31
Tabela 6 - Resumo de tipo de processo com detalhes e velocidade máxima utilizada .....	34
Tabela 7 - Parâmetros de soldagem do processo <i>twin arc</i> .....	35
Tabela 8 - Parâmetros de soldagem do processo <i>tandem arc</i> .....	35
Tabela 9 - Parâmetros geométricos dos cordões de solda: largura; penetração e reforço .....	38
Tabela 10 - Valores de área de reforço, área de penetração e diluição dos cordões de solda.....	41
Tabela 11 - Tamanho médio de grão na ZTA dos cordões soldados por SAW-T. ....	55
Tabela 12 - Porcentagem de Ferrita Acicular (AF) nos cordões de solda .....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Soldagem por arco submerso (SAW)</b> .....	<b>12</b>
<b>3.2</b>	<b>Soldagem com múltiplos arames</b> .....	<b>14</b>
3.2.1	Soldagem por arco submerso em tandem arc .....	16
3.2.2	Soldagem por arco submerso em twin arc.....	19
3.2.3	Soldagem por arco submerso com adição de arame frio.....	21
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Metal de base</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2</b>	<b>Consumíveis de soldagem</b> .....	<b>25</b>
<b>4.3</b>	<b>Equipamentos</b> .....	<b>25</b>
<b>4.4</b>	<b>Execução do processo de soldagem</b> .....	<b>27</b>
<b>4.5</b>	<b>Retirada dos corpos de prova</b> .....	<b>30</b>
<b>4.6</b>	<b>Caracterização Microestrutural</b> .....	<b>30</b>
4.6.1	Preparação Metalográfica .....	30
4.6.2	Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	31
<b>4.7</b>	<b>Ensaio de dureza</b> .....	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Parametrização do Processo de Soldagem</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise de características geométricas – cordões em tandem arc</b> .....	<b>37</b>
<b>5.3</b>	<b>Análise de características geométricas - cordões em twin arc</b> .....	<b>42</b>
<b>5.4</b>	<b>Caracterização do metal de base</b> .....	<b>50</b>
<b>5.5</b>	<b>Análise Microestrutural Geral</b> .....	<b>51</b>
<b>5.6</b>	<b>Análise Microestrutural – Tandem Arc</b> .....	<b>53</b>
<b>5.7</b>	<b>Análise Microestrutural – Twin Arc</b> .....	<b>61</b>
<b>5.8</b>	<b>Distribuição de Dureza</b> .....	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>71</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de tubulação são uma parte importante da infraestrutura em muitos setores. A soldagem se mostra como elemento indispensável na fabricação e na montagem de tubos, principalmente os que apresentam grandes diâmetros (Barros Jr, 2009). Os tubos podem ser produzidos com ou sem costura. Atualmente, cerca de dois terços dos tubos produzidos com costura no mundo utilizam a soldagem na sua fabricação. As tubulações que apresentam costura podem ser obtidas pelo tipo UEO (conformação da chapa realizada por três prensas distintas - a prensa “U” e a prensa “O” seguido de expansão a frio realizada “E”) e pelo tipo helicoidal (Sadowski; Rotter, 2014; Silva *et al.*, 2018).

Um problema na produção de tubos está relacionado ao seu transporte que é dificultado por suas grandes dimensões, tanto do produto acabado quanto das chapas utilizadas para sua fabricação (Aslani *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2018). Na produção de tubulação com costura helicoidal, segundo Silva *et al.* (2018) e Sadowski e Rotter (2014), há redução consideravelmente do custo com transporte e aumento de produtividade, uma vez que esse método de fabricação pode ser executado em campo além de possibilitar a fabricação contínua de tubos, com tamanhos maiores do que os produzidos comercialmente e oferecer como vantagem adicional ao processo a possibilidade de utilização da mesma largura de bobinas de aço em estoque que pode ser adaptada para construir tubos de vários comprimentos e diâmetros distintos não sendo necessários maiores investimentos para configuração diferente numa mesma linha de produção .

Como processo de soldagem, a soldagem por arco submerso (SAW) é apresentada como um dos métodos mais utilizados para a sua fabricação, devido a sua alta produtividade, facilidade de mecanização, possibilidade de alta penetração e alta velocidade de soldagem (Kiran; Na, 2014; Lafdani; Ghadiri Zahrani; Galloway, 2015). Na soldagem por arco submerso há possibilidade de utilização de variantes do processo, como a técnica conhecida como tandem-arc e twin arc. A primeira consiste no uso de dois ou mais arames alimentados numa mesma poça de fusão, em posição paralela à junta, com alimentação e fontes de energia independentes (isolamento de potencial) enquanto na segunda uma única fonte é utilizada e a corrente é dividida

entre os dois arames (sem isolamento potencial) (Kiran; Na, 2014; Tušek; Suban, 2003).

Ambas variantes possibilitam redução da energia de soldagem em relação à espessura soldada, proporcionando assim, um melhor controle do processo e uma melhor tenacidade em conjunto com alta taxa de deposição e velocidades de soldagem (Kiran; Na, 2014; Marques; Modenesi; Bracarense, 2014; Ribeiro, 2015; Tušek; Suban, 2003). A tecnologia de soldagem de tubulações encontra-se em constante desenvolvimento, atualizando-se para atender aos requisitos de soldabilidade de novos materiais e as crescentes necessidades de aumento da produtividade. O uso das variáveis (tandem e twin arc) traz vantagens para o processo produtivo de tubulação, pois agrega os fatores de aumento de produtividade, redução de custos e melhoria de propriedades mecânicas num único projeto (Aslani *et al.*, 2017; Kiran; Na, 2014; Mohammadijoo *et al.*, 2015; Tušek; Suban, 2003).

Dessa forma, o estudo dos processos de arco submerso com o uso de variantes torna-se importante para definir quais os impactos que podem ser gerados com o uso destas técnicas na produção de tubulação. Há poucas informações sobre um estudo de viabilidade e parâmetros técnicos do uso dos processos de soldagem em chanfro reto com espessura de 16 mm tanto para o tandem arc como para o twin arc. Além disso, este trabalho irá abordar o uso de tecnologia ICE (tecnologia desenvolvida pela ESAB), o qual se destaca em trabalhos recentes com o uso de arame frio na soldagem de alta produtividade.

## **2 OBJETIVOS**

Esta secção tem a finalidade de descrever os objetivos: geral e específico desta tese.

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a aplicabilidade da soldagem por arco submerso na fabricação de tubulação em campo com o aumento da quantidade de arames por meio do uso da variante do processo SAW em tandem arc e twin arc.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar a microestrutura de juntas soldadas pelo processo tandem arc e twin arc com adição de arame frio;
- Avaliar os impactos do arame frio na geometria, microestrutura e nas propriedades mecânicas da junta;
- Avaliar os impactos das mudanças microestruturais nas propriedades mecânicas da junta;
- Analisar a distribuição de dureza nas juntas soldadas como medida das propriedades mecânicas.
- Adequar os parâmetros de soldagem corretamente para atender as propriedades mecânicas especificadas;
- Correlacionar parâmetros, microestruturas, propriedades mecânicas e porcentagem de arame frio na junta soldada.
- Propor solução para aumento de produtividade na fabricação de tubos com costura espiral em campo com uso de múltiplos arames.

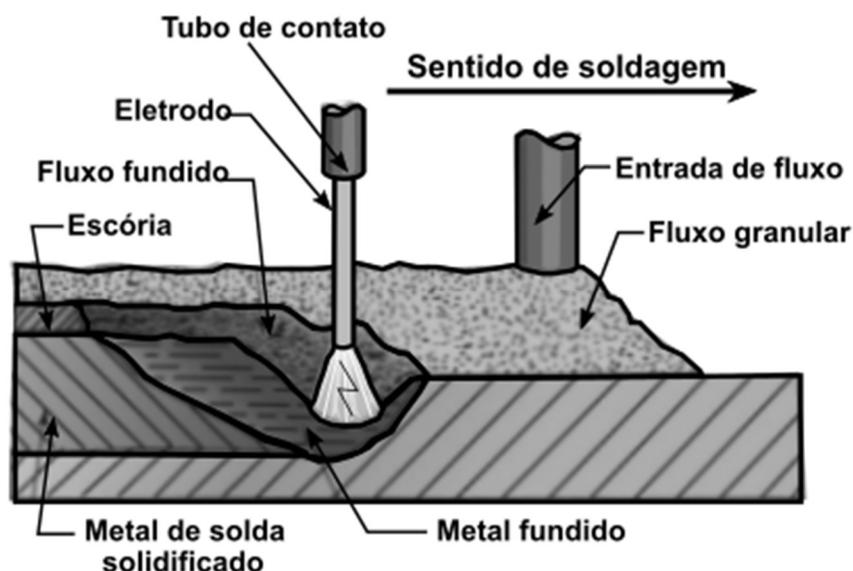
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os trabalhos mais relevantes relacionados a soldagem por arco submerso e suas variantes de processos como: soldagem com múltiplos arames, soldagem com arame germinado, soldagem com adição de arame frio. Além de apresentar as influências dos principais parâmetros de soldagem nas propriedades mecânicas de um cordão de solda.

#### 3.1 Soldagem por arco submerso (SAW)

O processo de soldagem por arco submerso (SAW) se caracteriza pela utilização de um arame metálico nu contínuo sobre a peça de trabalho, onde a união dos metais é produzida pelo aquecimento destes sob uma camada de fluxo que é adicionado com a função de proteger o arco contra atmosfera e a sua possível contaminação (Lippold, 2015; Marques; Modenesi; Bracarense, 2014). O arame, o arco e a poça de fusão ficam recobertos pelo fluxo constituído de minerais e materiais de adição, assim, o fluxo pode ser responsável pela limpeza e adição de elementos de liga (Lippold, 2015; Marques; Modenesi; Bracarense, 2014). A Figura 1 representa esquematicamente o processo SAW com um arame.

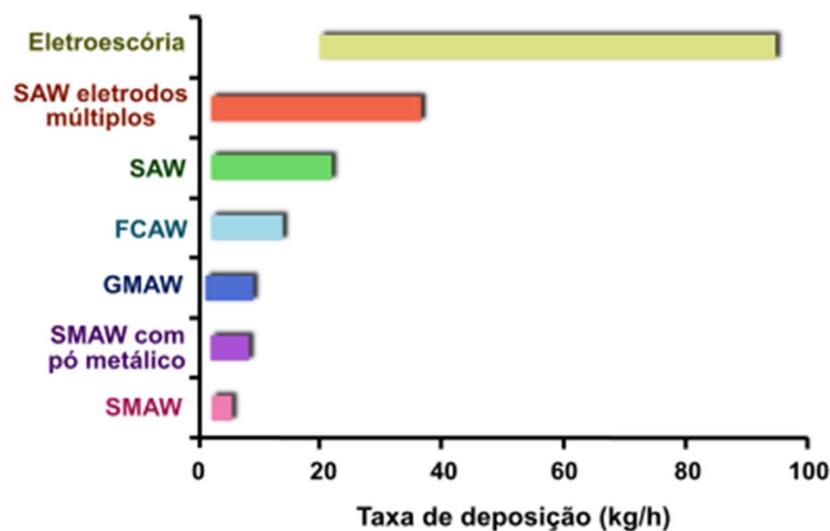
Figura 1 - Esquema do processo SAW com arame único



Fonte: Adaptação (2015)

A alta produtividade – alta taxa de deposição com velocidades superiores aos utilizados em processos tradicionais; alto rendimento (rendimento usual acima de 90%); facilidade de automatização, ausência de respingos – devido a proteção que o fluxo oferece; proteção contra luminosidade e radiação são algumas das vantagens que tornam esse processo preferível dentre outros, de acordo com Lafdani *et al.* (2014), Kiran *et al.* (2014), Fahrat (2007), Lu *et al.* (2014). A Figura 2 representa uma comparação de taxa de deposição entre os processos convencionais.

Figura 2 - Comparação esquemática da taxa de deposição para diversas técnicas de soldagem



Fonte: Adaptação de Barbosa (2018)

De acordo com Barbosa (2018), as vantagens do processo de soldagem por arco submerso o torna um dos mais utilizados e mais produtivos em soldagem de elevadas espessuras. Lafdani *et al.* (2015) aponta o processo SAW como o processo de mais alta qualidade na fabricação de tubos devido as altas velocidades e valores de penetração que podem ser alcançados. Para Borba *et al.* (2017), a variante de processo SAW – *tandem arc* – é uma alternativa para o aumento da produtividade na fabricação de torres eólicas, onde há possibilidade de redução do número de passes e aumento da taxa de deposição em soldas longitudinais e circunferências. As vantagens apresentadas para união de materiais também é considerada importante na produção de revestimentos conforme apresentado por Silva *et al.* (2016).

Embora possua inúmeras vantagens, este processo apresenta como limitação a restrição as posições de soldagem plana e horizontal com ângulo (Farhat, Hanan, 2007; Marques; Modenesi; Bracarense, 2014). Contudo, sua adaptabilidade o torna

um dos processos mais utilizados na fabricação de navios, tubos, vasos de pressão e manufaturas produzidas com elevadas espessuras, sendo ideal para soldas topo e filete (Dhas; Kumanan, 2011; Farhat, Hanan, 2007; Ribeiro, 2015).

Assim como nos demais processos de soldagem, o controle dos parâmetros na SAW também é de valiosa importância, pois definem a taxa de deposição, geometria do cordão e, principalmente, as propriedades mecânicas da junta soldada (Farhat, Hanan, 2007; Pepin, 2009). Os principais parâmetros de controle, considerados primários e listado em ordem de importância, para a soldagem com único arame, são: corrente de soldagem, tensão de soldagem e velocidade de soldagem (Kiran; Na, 2014; Kolhe; Datta, 2008).

O tipo mais comum de configuração para a soldagem por arco submerso (SAW) é a utilização de um único arame e uma fonte de soldagem. Entretanto, com o objetivo de aperfeiçoar esta técnica de soldagem, aumentar o desempenho e a taxa de deposição, encontram-se na literatura diversos estudos com as variantes desse processo, como as configurações com múltiplos arames (*tandem arc* e *twin arc*) ou adição de arames (*cold wire* e *hot wire*), mesmo com algumas delas não sendo exclusiva da soldagem por arco submerso (Castro, 2017; Kiran; Na, 2014; Marques; Modenesi; Bracarense, 2014; Tušek; Suban, 2003)

Na soldagem com múltiplos arames, a quantidade de parâmetros de processo a serem considerados aumentam consideravelmente, entre eles acrescentam-se a distância entre arames, polaridade de corrente, quantidade de arames, ângulo de ataque dos arames, velocidade alimentação dos arames, interação entre arcos (Kiran; Na, 2014; Lafdani; Ghadiri Zahrani; Galloway, 2015). Estudos de Kiran *et al.* (2015, 2014; 2012) com dois e três arames em tandem exibem a diferença entre a energia absorvida nos ensaios de impacto, diferença entre geometria das juntas e variações de microestruturas nas zonas de fusão, e afirmam a extrema importância encontrar os parâmetros ótimos para cada arranjo de soldagem.

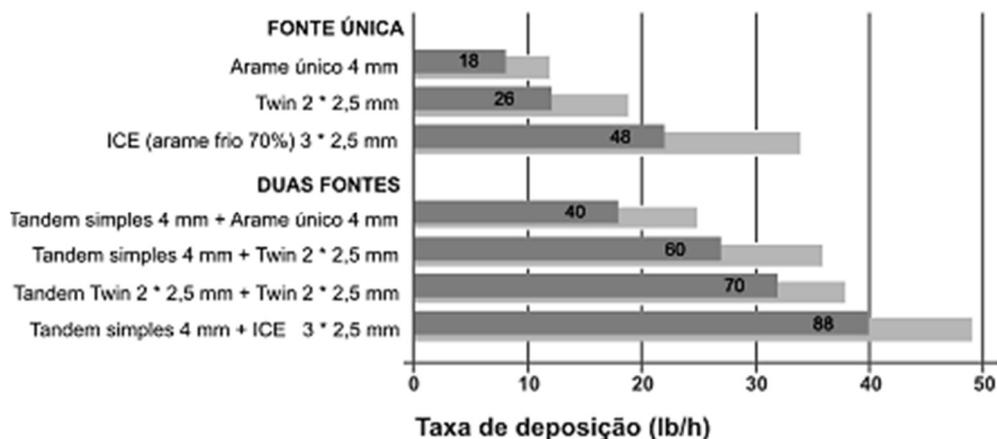
### **3.2 Soldagem com múltiplos arames**

Variante do processo SAW, a utilização de múltiplos arames em arranjos com dois ou mais arames e fontes de soldagem individuais ou compartilhadas, podendo ser CA ou CC, utilizando uma variada faixa de variadas, são cada vez mais empregadas por

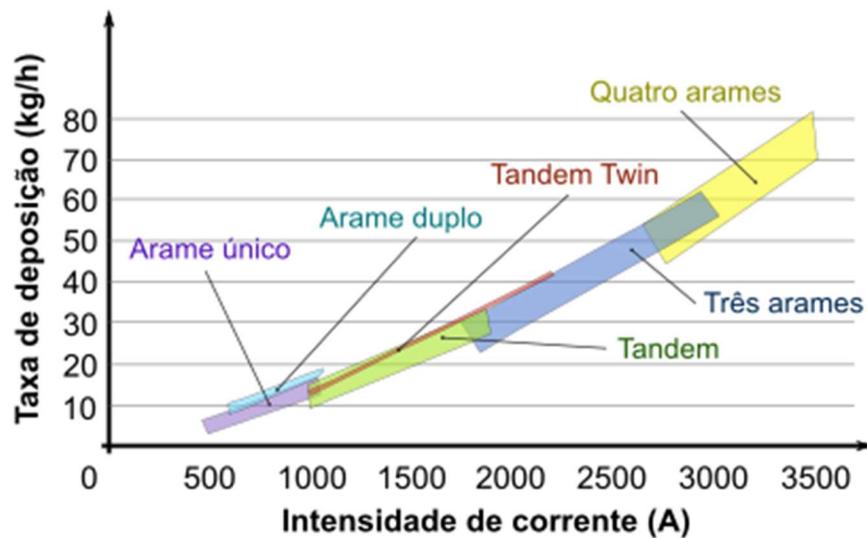
apresentar benefícios de aumento da taxa de produção sem aumento no aporte térmicos, principalmente nos setores industriais onde se faz necessário a elevada produtividade nas soldagens de cordões de média a altas espessuras que necessitariam, a princípio, de multipasses, como por exemplo: na fabricação de vasos de pressão; dutos e estruturas offshore (Kiran; Na, 2014; Kiran; Basu; De, 2012; Lafdani; Ghadiri Zahrani; Galloway, 2015; Li; Lu, 2012).

Tomando a taxa de deposição como principal resposta para a escolha do processo SAW na indústria foram desenvolvidas variantes para elevar ainda mais o ganho de produtividade do sistema de soldagem (Barbosa, 2018; Castro, 2017; Tušek; Suban, 2003). A Figura 3 ilustra as taxas de deposição típicas das variantes do processo SAW.

Figura 3 – Taxas de deposição típicas das variantes do processo SAW



(a)



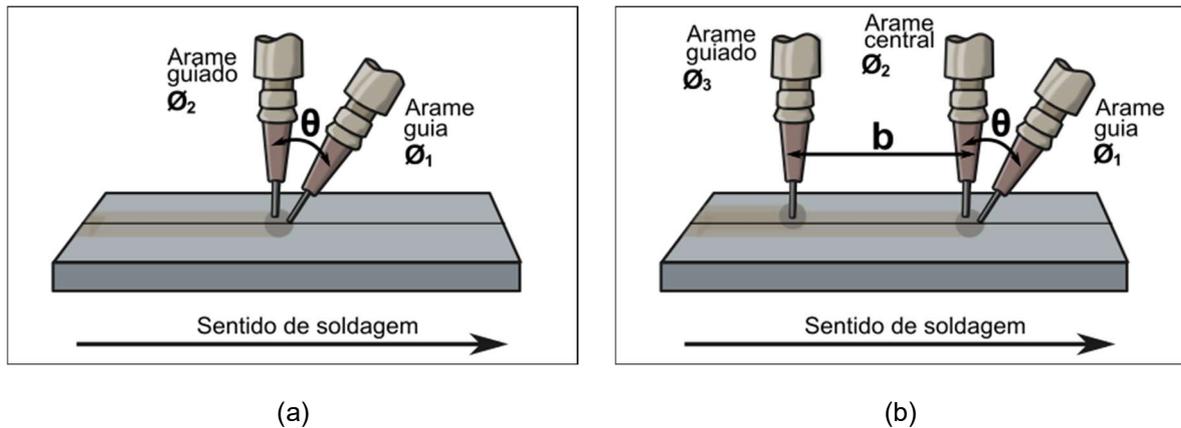
(b)

Fonte: (a) Adaptado de ESAB (2018) (b) Adaptado de Layus *et al.* (2014).

### 3.2.1 Soldagem por arco submerso em tandem arc

A técnica *tandem arc* consiste na utilização de dois ou mais arames de solda com uma fonte independente para cada arame utilizado para a produção de uma única poça de fusão (Kiran *et al.*, 2010; Kiran; Basu; De, 2012; Layus *et al.*, 2014). Neste tipo de configuração os arames são alimentados por sistemas independentes (KIRAN; NA, 2014; LAFDANI; GHADIRI ZAHRANI; GALLOWAY, 2015). De acordo com Kiran e Na (2014), a soldagem por arco submerso com dois arames na configuração *tandem arc* se apresenta como alternativa, em potencial, de substituição do convencional com arame único para união de chapas de média a alta espessura. Essa técnica permite que sejam utilizados até seis arames, cada um com fonte individual, assim a variação e ganho na produção depende da quantidade de arames utilizados num único cordão e da configuração que são dispostos (Layus *et al.*, 2014). A Figura 4 representa esquematicamente o sistema tandem-arc com dois e três arames.

Figura 4 - Esquema o sistema tandem-arc com dois e três arames



Fonte: Autoria própria

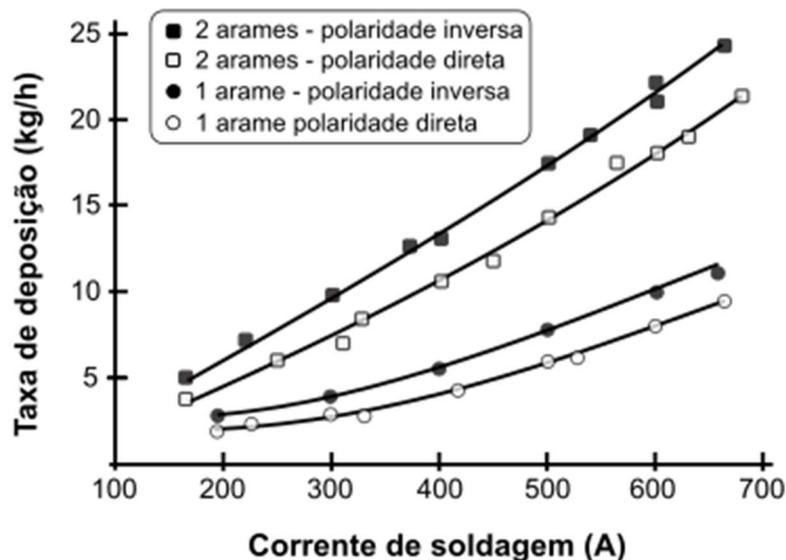
Em arranjos de múltiplos arames, a configuração mais usual é que o primeiro arame chamado de lead ou guia tenha polaridade positiva (DC) e os demais arames – trail ou guiado - em corrente alternada (AC) (Kiran; Na, 2014; Kiran *et al.*, 2014; Lafdani; Ghadiri Zahrani; Galloway, 2015). Além disso, o arame lead é o responsável por fornecer a penetração, por isso, apresenta maiores valores de corrente enquanto os demais favorecem o enchimento e controle da geometria do cordão (Kiran; Na, 2014; Kiran *et al.*, 2014; Mohammadijoo *et al.*, 2015). A diferença entre as polaridades da corrente utilizada entre os cordões é gerada para reduzir a influência de interação entre os arcos (sopro magnético), outra forma de minimizar os efeitos negativos é utilizar as correntes em fases diferentes, assim é uma ajustada para que esteja em valores máximos enquanto, a outro fica definida para zero (Barbosa, 2018; Kiran *et al.*, 2014; Layus *et al.*, 2014).

Pepin (2009) descreve que a diferença entre as correntes do lead e trail devem estar em torno de 0 a 200 A, enquanto a tensão entre 0 e 6 V, pois variações fora desta faixa podem distorcer o arco e causar defeitos na geometria do cordão. Kiran e Na (2014) afirmam que as variações de polaridade do arco prejudicam a qualidade geométrica do cordão de solda, pois afeta a distribuição de energia do arco e em estudo, Kiran *et al.* (2015, 2014) analisou a interação dos arcos na configuração tandem com dois e três arames e sua influência na poça de fusão, além de desenvolver modelos numéricos para estas interações. Para Lafdani *et al.* (2015), a penetração é influenciada pelo arame guia e as características geométricas do cordão pelos arames guiados, além de reduzir a taxa de resfriamento.

No sistema *tandem*, outras variáveis, como polaridade da corrente, interação entre os arcos, distância entre arames, stick-out, forma de onda, diâmetro e inclinação do arame se tornam importantes e a sua avaliação determina padrões de qualidade no cordão de solda que compreende geometria e propriedades da junta (Aslani *et al.*, 2017; Kiran; Na, 2014; Lafdani; Ghadiri Zahrani; Galloway, 2015). A possibilidade de independência entre os arames torna o processo um sistema com uma ampla gama de configurações, permitindo uma enorme faixa de variação dos parâmetros (Cardoso Junior, 2018; Layus *et al.*, 2014).

As taxas de deposição alcançadas com o uso da configuração *tandem* com dois arames, por exemplo, chega a mais de duas vezes em comparação com o uso de único arame (Castro, 2017). Em configuração de três arames, esse valor pode chegar a três vezes maior e velocidades de soldagem de até 2,5 m/min (Layus *et al.*, 2014). A Figura 5 apresenta as taxas de deposições em relação ao número de arames e correntes utilizadas em três arranjos de *tandem* com um, dois e três arames, onde podemos perceber que a taxa de deposição aumenta ligeiramente exponencialmente com o aumento do número de arames (Tušek; Suban, 2003).

Figura 5 – Taxa de deposição em configurações diferentes de *tandem*



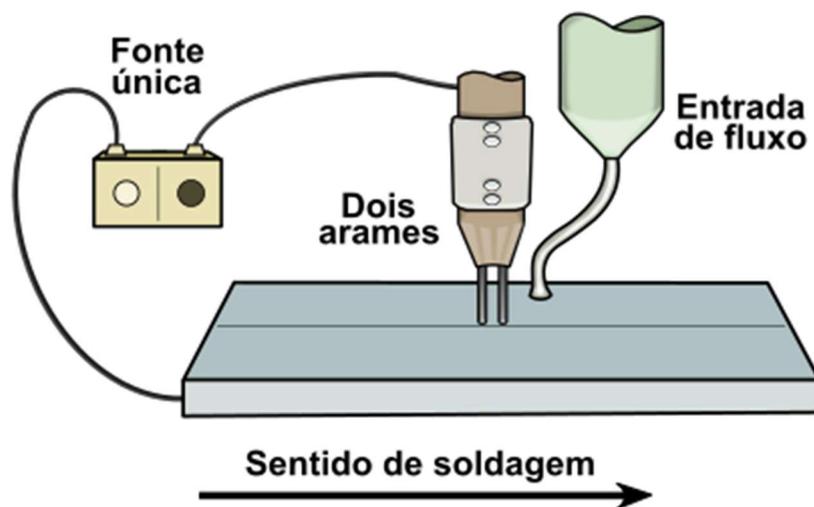
Fonte: Adaptado de Tušek; Suban (2003)

O processo *tandem arc* proporciona maior flexibilidade de aplicação e possibilidade de uso velocidades de soldagem mais elevadas, o que irá depender diretamente do número de arame e arranjo escolhido (Castro, 2017; Layus *et al.*, 2014).

### 3.2.2 Soldagem por arco submerso em *twin arc*

Na configuração *twin arc*, a mesma fonte alimenta o conjunto de arames, comumente usam-se dois arames conectados num mesmo cabeçote e a corrente é dividida entre os arames (Castro, 2017; Tušek; Suban, 2003). Essa variante do processo de soldagem por arco submerso também é chamada de arames germinados e está representada esquematicamente na Figura 6 (Sharma *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2011).

Figura 6 – Esquema configuração *twin arc* com dois arames



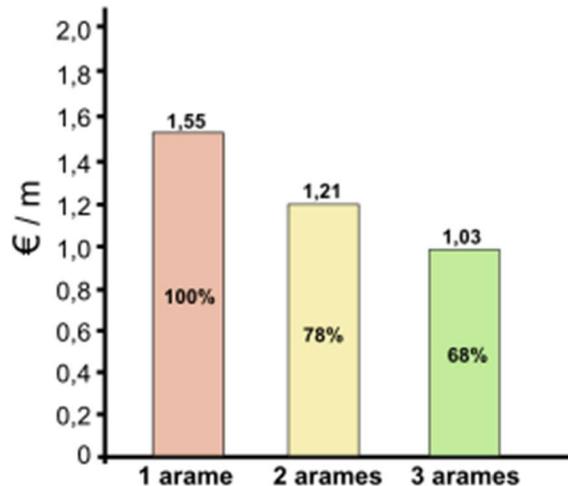
Fonte: Autoria própria

Segundo Sharma *et al.* (2009; 2008) a principal característica no arranjo *twin* é a alta deposição e penetração superficial, uma vez que a energia fornecida pela fonte é igualmente dividida entre os arames da configuração. A interação gerada pelos dois arcos faz com que o comportamento apresentado seja diferente do processo com arame simples, no *twin* há maior concentração de energia para a fusão do arame e menor carga para penetração (Sharma *et al.*, 2009; Sharma; Arora; Mishra, 2008).

Tusek, Umek e Bajcer (2005) compararam o uso de um, dois e três arames em configuração *twin* afim de avaliar os custos envolvidos no processo de soldagem com esta configuração. Os principais resultados encontrados por estes autores foram que alterar a configuração de um para até três arames no mesmo sistema não é considerada onerosa; a distância entre os fios nesta configuração deve ser o suficiente para gerar uma poça de fusão similar a com arame único; a taxa de deposição com

três arames chega a 3,5 vezes o valor quando comparado com arame único; os custos relativos são cerca de 30% menor quando se utiliza três arames (Figura 7).

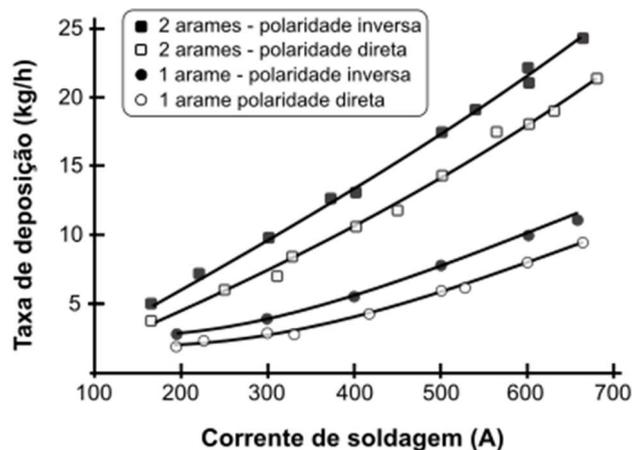
Figura 7 - Custos relativos do processo de soldagem com 1, 2 e 3 arames

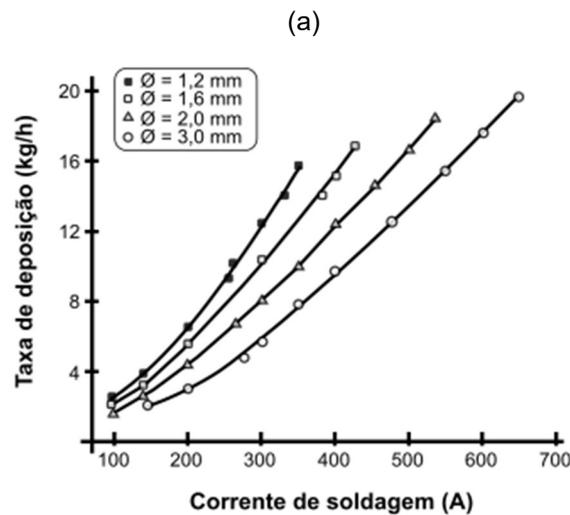


Fonte: Adaptado de Tusek, Umek e Bajcer (2005)

Tusek *et al.* (2003; 2005) estudaram a influência da intensidade de corrente na taxa de fusão do *twin* com dois arames e comparou com o arame único, onde de acordo com estes autores pode-se notar conforme Figura 8, que a taxa de fusão aumenta exponencialmente de acordo com o incremento da corrente. Além disso, segundo o mesmo autor o diâmetro do arame não apresenta influência significativa na taxa de fusão, por exemplo, na configuração com dois arames germinados de 3 mm de diâmetro, a resposta da taxa de fusão chega a 35% menor do que com um arame de 1,2 mm e mesma intensidade de corrente.

Figura 8 - Gráfico de taxa de deposição (a) comparativo de taxa de deposição com um e dois arames (b) comparativo de taxa de deposição com diâmetros de arames diferentes





(b)

Fonte: Adaptado de Tusek (2000).

Para Sharma *et al.* (2008), a resposta encontrada na taxa de fusão para dois arames de menor diâmetro quando comparado com arame único é de aproximadamente 30 a 50% maior. O aumento da taxa de deposição é garantida pelo aumento na densidade de corrente e pela interação entre os arcos de ambos os arames o que gera mais calor. Em relação ao arame único, Sharma *et al.* (2008) e Tusek *et al.* (2000) consideram o *twin* com dois arames mais produtivo.

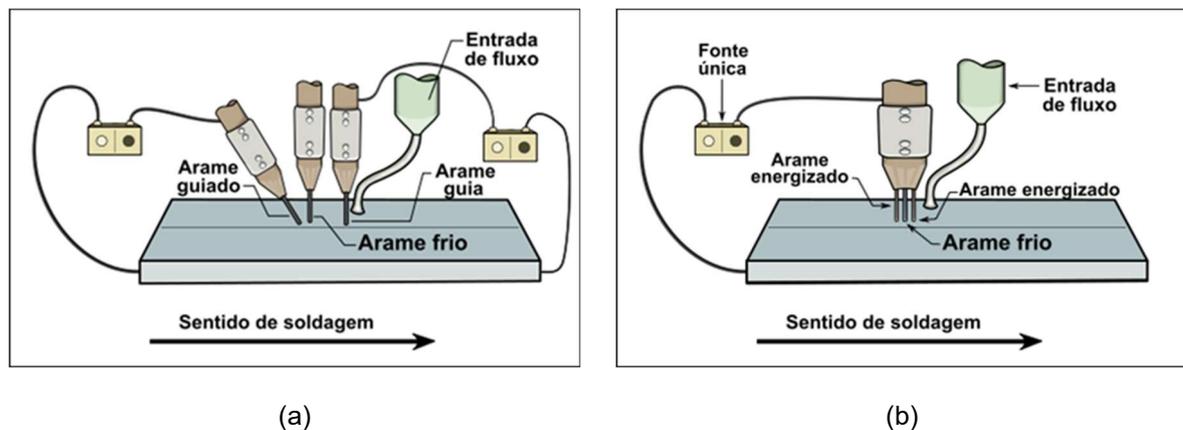
Todos os estudos citados nesta seção comprovaram o aumento da taxa de deposição e produtividade com o uso de *twin arc* com dois ou três arames, além das vantagens relacionadas ao custo de produção do processo de soldagem por essa técnica em especial (Sharma *et al.*, 2009; Sharma; Arora; Mishra, 2008; Tušek; Suban, 2003; Tušek, 2000; Yang *et al.*, 2011).

### 3.2.3 Soldagem por arco submerso com adição de arame frio

Além das variações típicas da soldagem por arco submerso com a adição de arames com fontes independentes ou não, em configuração *tandem* ou *twin*, a adição de um arame no arranjo sem a presença de corrente é uma das opções atualmente utilizadas para o aumento da produtividade, em especial do aumento da taxa deposição (Castro, 2017; Mohammadjoo *et al.*, 2015, 2017b, 2017a; Ramakrishnan; Padmanaban; Muthupandi, 2013).

A adição de arame frio é também utilizada como variante tandem, geralmente ele é posicionado após o último arame energizado. Dessa forma há menor possibilidade de interferir na penetração do cordão e demais medidas geométricas (Mohammadijoo *et al.*, 2015, 2017b). A entrada de calor é reduzida, pois parte da energia gerada pelo arco é usada para fundir o arame não energizado, entretanto para a mesma quantidade de calor maiores taxas de deposição resultam em menor penetração (Barbosa, 2018; Castro, 2017; Mohammadijoo *et al.*, 2015). A Figura 9 apresenta esquematicamente exemplos de configurações com arame frio.

Figura 9 - Esquema de configuração com adição de arame frio (a) adição de arame frio em configuração tandem (b) adição de arame frio em configuração *twin*



Fonte: Autoria própria

Ramakrishnan *et. al.* (2013) afirma que a adição de arame frio proporciona um aumento na taxa de deposição sem necessidade de aumento de energia de entrada, reduz o tamanho de grão da ZTA (zona afetada pelo calor) e produz cordões de solda de melhor qualidade. Em seus experimentos com uso de arame frio na configuração em tandem, ele obteve o aumento de 200% na taxa de deposição, redução em 30% da ZTA em relação ao processo convencional, redução de 40% no número de passes, 30% de economia no consumo do fluxo, além de melhoria significativa na tenacidade de zona fundida.

Cardoso (2018) estudou a influência da adição de arame frio nas características geométricas de juntas soldadas de aços inoxidáveis duplex, além das características químicas, corrosivas, mecânicas e metalúrgicas. Ele variou a energia de soldagem e a porcentagem de arame frio adicionado a poça de fusão, as demais variáveis permaneceram contantes. Segundo este mesmo autor, o reforço e a área depositada aumentaram diretamente com a maior quantidade de arame frio, porém área fundida

diminuiu consequência da redução da energia de diluição. Entretanto, houve um aumento de taxa de deposição proporcional ao aumento da porcentagem de arame frio inserido na poça de fusão. Não houveram mudanças perceptíveis na composição química nem microestruturais do metal de solda. O autor ainda discute sobre a não observância de impacto claro na ZTA (Cardoso Junior, 2018; Cardoso Junior *et al.*, 2018).

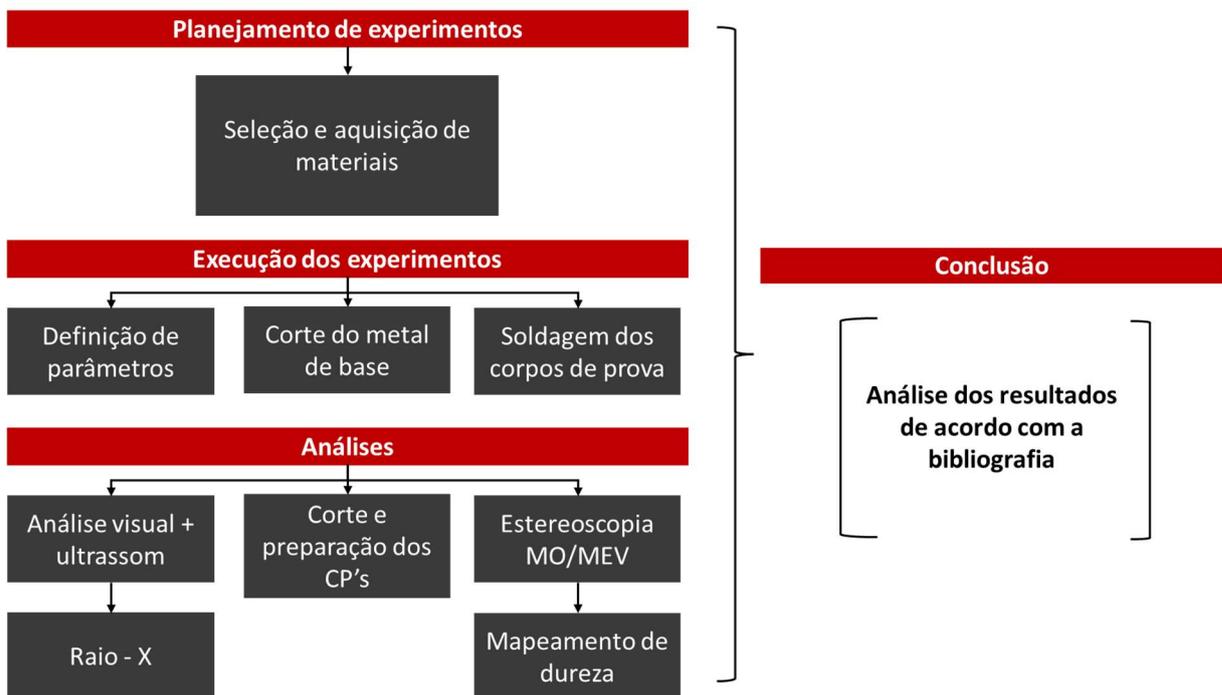
Mohammadijoo *et al.* (2015) descreve em seu trabalho sobre o desenvolvimento e otimização de parâmetros da tecnologia do arame frio e que essa técnica é desejada nas indústrias de tubulação, inclusive com soldas espirais. Para tal, o autor realizou um experimento com 36 corridas para analisar as características geométricas do cordão, além da microdureza da zona fundida e zona termicamente afetada. Parâmetros geométricos, segundo o autor, não são significativamente alterados com a adição do arame, entretanto, a microdureza tanto na ZF como na ZTA sofreram redução devido a redução do considerável do calor total introduzido na poça de fusão e consequente alteração na taxa de resfriamento (Mohammadijoo *et al.*, 2015).

Adicionar arame frio na poça de fusão no processo de soldagem por arco submerso seja na configuração *tandem* como *twin* contribui para a redução do aporte térmico aplicado à peça, em virtude do arame não energizado consumir parte do calor, aumentando a taxa de resfriamento. Dessa forma, temos: aumento de tenacidade, redução de ZTA, cordões com características geométricas de melhor qualidade, aumento da taxa de deposição e aumento de produtividade como algumas vantagens principais (Barbosa, 2018; Cardoso Junior *et al.*, 2018; Castro, 2017; Mohammadijoo *et al.*, 2015, 2017b, 2017a; Ramakrishnan; Muthupandi, 2013; Ramakrishnan; Padmanaban; Muthupandi, 2013).

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental adotado neste trabalho está de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 10. Apresenta-se de forma geral a ordem de realização do processo de soldagem, determinação de parâmetros, descrição dos materiais e etapas de análises de resultados com seus respectivos ensaios.

Figura 10 - Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Autoria própria

### 4.1 Metal de base

O metal de base utilizado neste trabalho foi o aço estrutural de alta resistência ASTM A572 Gr 50. A composição química e as propriedades mecânicas de acordo com certificado encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química e propriedades mecânicas do metal de base

Composição química (%)					Propriedades mecânicas			Carbono equivalente (%)
C	Mn	P	S	Si	LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR	
0,23	0,40	0,04	0,05	0,50 - 1,35	345	450	0,77	0,337

CE\* - calculado de acordo com WII

Fonte: Cedisa, 2019.

## 4.2 Consumíveis de soldagem

Os consumíveis de soldagem utilizados foram os arames de classificação AWS 5.23: F8A2-EA2-A4 com diâmetro de 2,5 mm para soldagem *twin arc* e arame AWS 5.17: F6A4-EL12 com diâmetro de 4 mm para soldagem *tandem arc* em ambos os passes. Para todas as condições de soldagem utilizou-se o fluxo aglomerado básico e índice de basicidade de 1,6 de acordo com certificado fornecido pelo fabricante com nome comercial OK FLUX 10.71.

A Tabela 2 apresenta a composição química e propriedades mecânicas típicas dos consumíveis utilizados, segundo certificado de qualidade fornecido pelo fabricante.

Tabela 2 - Composição química e propriedades mecânicas dos consumíveis

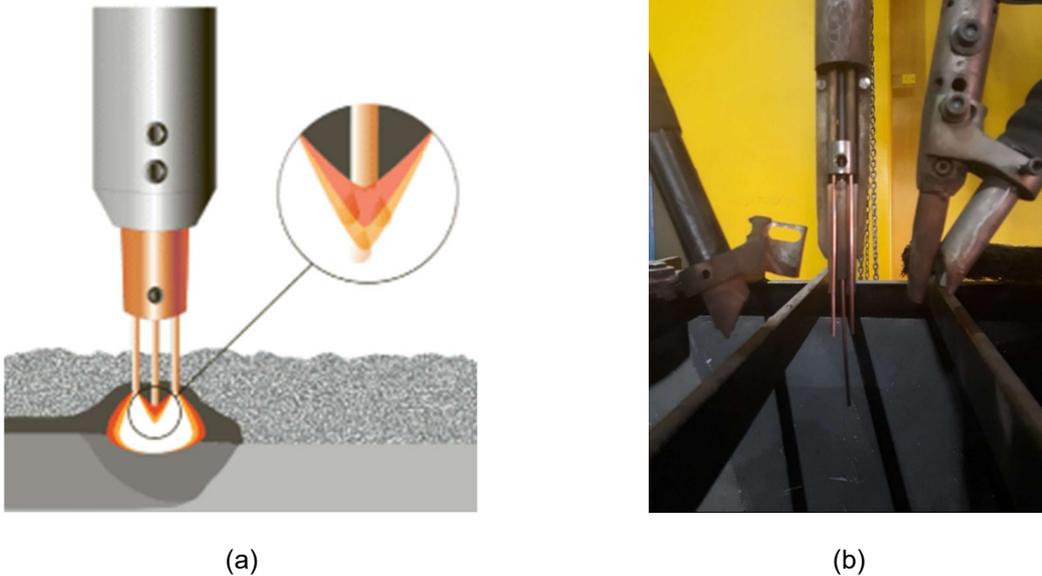
Processo	Consumíveis	Composição química típica (%)				Propriedades mecânicas		
		Mn	Mo	C	Si	LE (Mpa)	LR (Mpa)	A (%)
<i>Twin</i> + arame frio	A5.23: EA2-A4	1,1	0,5	0,1	0,1	500	580	24
<i>Tandem</i>	A5.17: F6A4-EL12	0,5	-	0,09	<0,1	360	465	30

Fonte: Esab, 2019.

## 4.3 Equipamentos

Para soldagem dos experimentos pelo processo *twin arc* foi utilizado o sistema de soldagem de arames germinados com adição de arame frio, tecnologia Esab, denominado ICE (*Integrated Cold Electrode*). Este sistema utiliza um terceiro arame eletricamente isolado e paralelo aos dois fios energizados no mesmo dispositivo de contato, alimentados por uma única fonte de soldagem, onde o arame frio é adicionado em uma porcentagem da velocidade de alimentação dos arames energizados, a Figura 11 apresenta o esquema da tocha desse sistema.

Figura 11 - Tocha ICE: a) detalhe da interação entre os arcos; b) detalhe da tocha ICE



Fonte: Autoria própria

O sistema é montado numa coluna de solda, conforme Figura 12. Onde um cabeçote automático de soldagem é acoplado com o alimentador de três arames e o fluxo. A fonte de alimentação utilizada foi a inversora Aristo AC/DC de 1000 ámperes. A polaridade utilizada foi DC+ para promover maior penetração a peça a ser soldada. Os parâmetros de soldagem após definidos são inseridos na central de controle PEK para gerenciar as variáveis de soldagem (esse módulo fornece todas as informações ao fim do processo).

Figura 12 - Equipamento de soldagem *twin arc*



Fonte: Autoria própria

Para as condições soldadas em *tandem arc* com dois arames, foram utilizadas duas fontes inversoras Aristo AC/DC 1000, sendo uma para cada arame utilizado. O sistema consiste em duas tochas e dois sistemas alimentação de fluxo, ambos montados numa coluna de soldagem conforme Figura 13.

Figura 13 - Equipamento de soldagem *tandem arc*



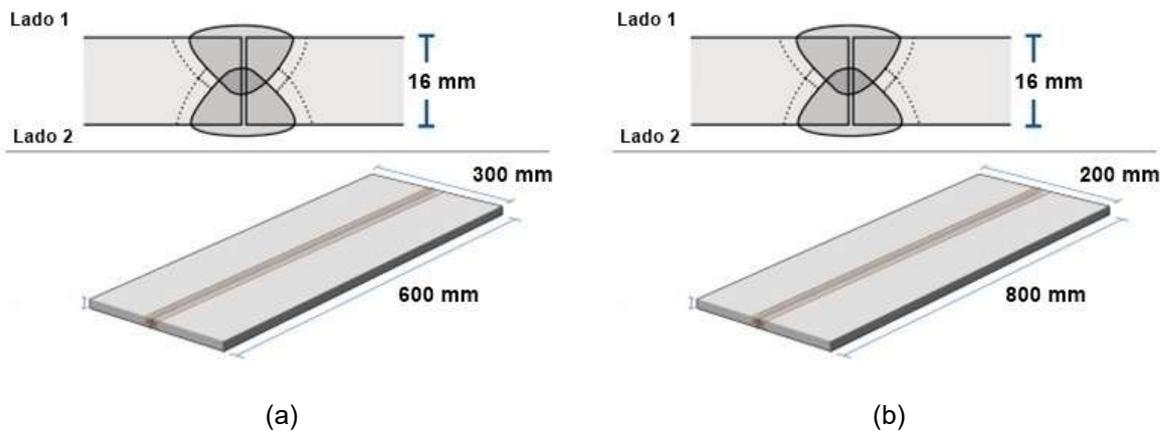
Fonte: Autoria própria

#### 4.4 Execução do processo de soldagem

Para parametrização foram realizadas 13 condições de soldagem, sendo 10 condições em *twin arc* (onde foram seleccionadas seis para este estudo) e três condições *tandem arc*. As juntas soldadas foram executadas conforme planeamento prévio, com parametrização definida com base na pesquisa bibliográfica de dados técnicos adquiridos em literatura aberta. Após execução de cada cordão, foi realizado o corte de uma secção transversal, realizada inspeção visual, preparação metalográfica e análise de macrografia. Diante do resultado obtido alterou-se os valores de velocidade de soldagem tanto para o processo *tandem* quanto para o *twin*.

Para projeto da junta utilizou-se tipo topo, chanfro reto sem abertura de raiz. Não houve tratamento térmico pós soldagem. A Figura 14 representa o esquema do projeto da junta. É importante destacar que em cada uma das amostras foram realizados dois passes de solda, identificados em lado 1 para primeiro passe e lado 2 para o segundo passe com variáveis de soldagem idênticas.

Figura 14 - Esquema junta soldada (a) tandem arc (b) twin arc



Fonte: Autoria própria, 2019.

As soldagens em *twin arc* foram executadas em posição plana (1G), com as chapas fixas enquanto as tochas se moviam. Para todos os experimentos de *twin* com adição de arame frio, as variáveis: a corrente de soldagem, polaridade (DC+), tensão e a stick-out (27,5 mm) foram mantidas constantes. Apenas a velocidade de soldagem foi alterada para se obter energias de soldagem (*heat input*, HI) distintas e a velocidade de alimentação de arame frio (AF) em 0; 20 e 70%. Os parâmetros de soldagem para as amostras estudadas estão expostos na Tabela 3.

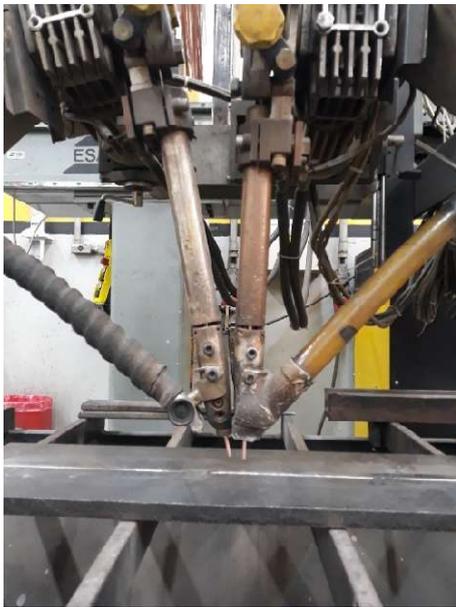
Tabela 3 - Parâmetros de soldagem pelo SAW *twin* com adição de arame frio

Amostra	V (cm/min)	%Frio	Passe	I (A)	V (V)	Aporte (kJ/mm)
I0V60	60	0	1	900	29	2,61
			2	900	29	2,61
I20V55	55	20	1	980	32	3,42
			2	980	32	3,42
I70V55	55	70	1	980	32	3,42
			2	980	32	3,42
I20V40	40	20	1	980	32	4,70
			2	980	32	4,70
I70V40	40	70	1	980	32	4,70
			2	980	32	4,70
I0V40	40	0	1	980	32	4,70
			2	980	32	4,70

Fonte: Autoria própria, 2019.

As soldas realizadas em SAW *tandem* foram executadas em posição plana (1G) com chapas fixas e as tochas em movimento. A configuração do arranjo das tochas é apresentada no esquemático na Figura 15.

Figura 15 - Esquema do arranjo da configuração da tocha em tandem arc: (a) Imagem real da tocha; (b) Esquema com detalhes



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, 2019.

A primeira tocha denominada (lead) foi montada sem inclinação na posição em  $0^\circ$  e polaridade positiva (DC) e a segunda tocha (trail) foi montada com inclinação em  $15^\circ$  e polaridade alternada (AC). A distância entre arames foi de 25 mm e stick-out de 25 mm para o arame lead e 30 mm para o arame trail. Para todos os experimentos apenas a velocidade de soldagem foi alterada, conforme apresentado em Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de soldagem para SAW – *tandem arc*

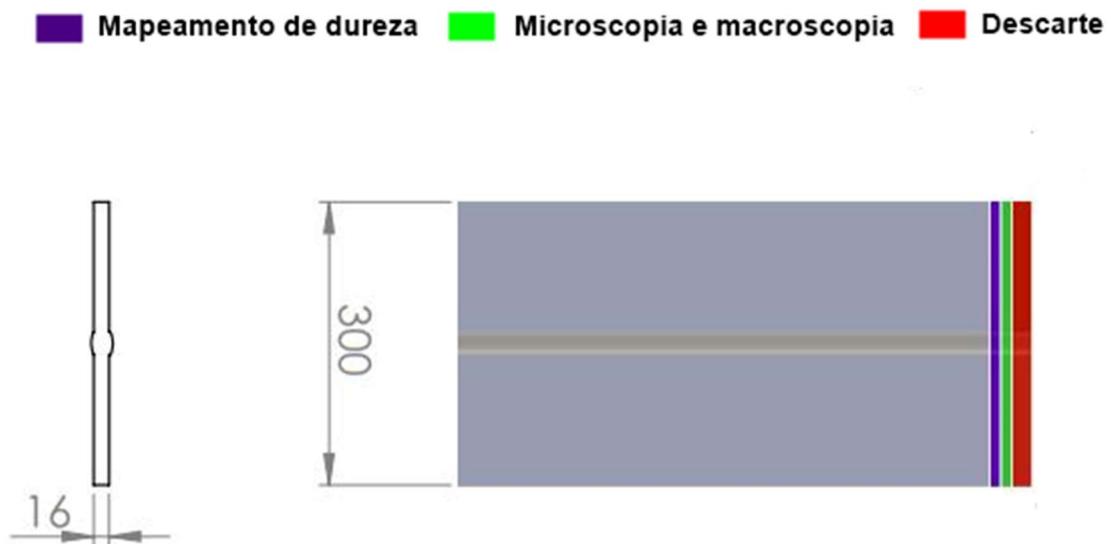
Parâmetros de soldagem							
Amostra	v(cm/min)	Passes	Lead		Trail		Aporte (kJ/mm)
			I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	
T160	160	1º Passe	950	33	650	38	2,10
		2º Passe	950	33	650	38	
T140	140	1º Passe	950	33	650	38	2,40
		2º Passe	950	33	650	38	
T120	120	1º Passe	950	33	650	38	2,80
		2º Passe	950	33	650	38	

Fonte: Autoria própria, 2019.

#### 4.5 Retirada dos corpos de prova

A retirada dos corpos de prova foram executados conforme esquema da Figura 16. As chapas foram cortadas perpendicularmente aos cordões de solda para as análises de macroscopia, microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e dureza. As bordas, tanto no início quanto no fim, foram descartadas a partir do ponto onde se observou visualmente a perda de estabilização do cordão de solda.

Figura 16 - Esquema de corte para extração de amostras dos cordões de solda



Fonte: Autoria própria, 2019.

#### 4.6 Caracterização Microestrutural

Os cordões de solda foram caracterizadas por técnicas de estereoscopia, microscopia ótica – MO e microscopia eletrônica de varredura – MEV.

##### 4.6.1 Preparação Metalográfica

A preparação dos corpos de prova para ensaio metalográfico foi efetuado inicialmente com o corte perpendicular ao cordão de solda. Em seguida, efetuou-se o lixamento com lixas d'água nas granulometrias de sequência de #100, #180, #220, #320, #400, #600 e #1200.

Após essa etapa foi realizado o polimento utilizando pastas abrasivas de diamante com granulometrias e sequência de 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ , seguido de ataque químico por

imersão apresentados na Tabela 5. Finalmente os corpos de prova foram lavados com água destilada e álcool, e secados com o auxílio de um soprador térmico.

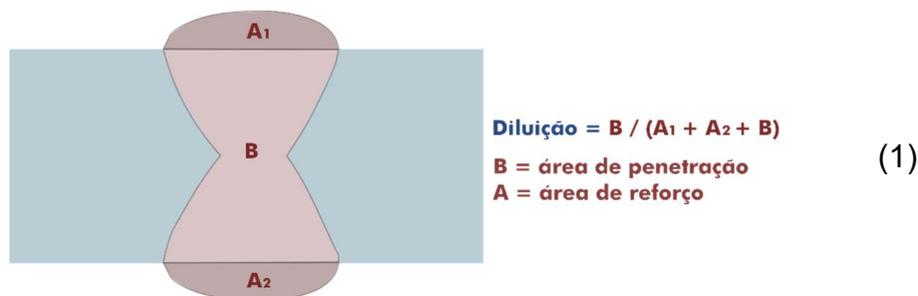
Tabela 5 - Ataque químico utilizado na revelação dos microconstituintes

Ataque químico	Composição	Aplicação
Nital 5%	5ml. HNO <sub>3</sub> + 95ml Álcool Etílico	Revelar contorno de grão e diferenciar microconstituintes ferrita e perlita
Le Pera	Metabissulfito de Sódio (1 g por 100 mL) + Picral (solução de 4g de ácido pícrico em 100 mL de álcool etílico)	Destacar microconstituintes como bainita e martensita

Fonte: Autoria própria, 2019.

#### 4.6.2 Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nessa etapa foram obtidas e caracterizadas imagens por estereoscopia, microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Inicialmente foi efetuado a macrografias dos cordões de solda e para isto foi utilizado o estetoscópio Zeiss empregando o aumento de 10 vezes, posteriormente foi efetuado o cálculo da diluição por meio da Equação 1 e auxílio do software livre ImageJ.



Onde, D é o coeficiente de diluição; A é a área de reforço e B é a área do penetração.

Para a caracterização das microestruturas da zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA) utilizou-se o microscópio ótico Axion - com aumento de 100 a 500 vezes - e Microscópio Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (MEV/EDS) da marca Tescan MIRA3 (Figura 17).

A identificação dos constituintes microestruturais foi executada de acordo com a nomenclatura proposta pelo International Institute of Welding (IIW) (Thewlis, 2004).

Figura 17 - Equipamentos utilizados para captura de imagens: Microscópio (a) ótico (MO) (b) eletrônico de varredura (MEV)



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, 2019.

#### 4.7 Ensaio de dureza

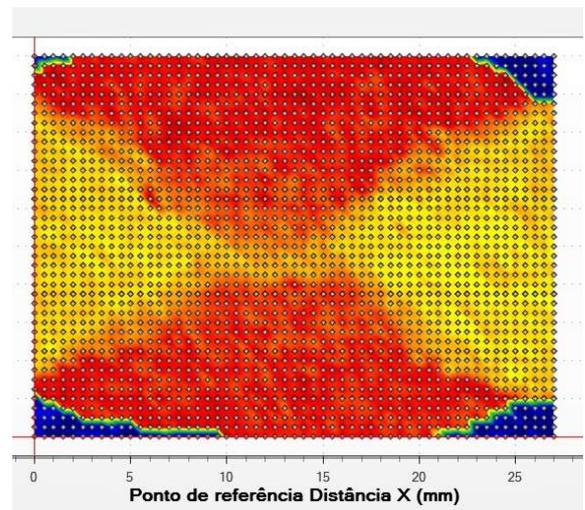
Para determinação dos valores de dureza foi realizado mapeamento em amostras retiradas para uso específico desta etapa. O ensaio de dureza Vickers foi realizado num microdurômetro Emcotest Durascan Modelo G5, com carga de 500 g, tempo de carga de 15 s e distância entre os pontos de indentação de 0,5 mm. As medições foram realizadas na seção transversal do corpo de prova soldado (

Figura 18), com o objetivo de realizar o mapeamento e o perfil de microdureza das diferentes regiões do cordão de solda (MB, ZTA e ZF).

Figura 18 - (a) Equipamento de mapeamento de dureza; (b) esquema do mapeamento na secção transversal do cordão de solda



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, 2019.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados alcançados por este trabalho juntamente com as discussões de acordo com a literatura.

### 5.1 Parametrização do Processo de Soldagem

Para determinar as condições de soldagem adequadas para realização do cordões de solda foram consideradas informações da literatura aberta, informações técnicas da empresa executora da soldagem, além de parâmetros constantes em EPS - Especificação do Processo de Soldagem - da empresa que apoia este projeto (Barbosa, 2018; Cardoso Junior *et al.*, 2018; Castro, 2017; Fortes; Araújo, 2018).

A Tabela 6 apresenta alguns experimentos com valores de velocidade de soldagem e espessura de cordões efetuados.

Tabela 6 - Resumo de tipo de processo com detalhes e velocidade máxima utilizada

<b>Autores</b>	<b>Processo</b>	<b>Velocidade máxima</b>	<b>Detalhes</b>
Castro, 2018	Twin	60 cm/min	Cordões sobre chapa, passe único, penetração máxima de 6 mm, corrente máxima 900A; uso de arame frio
Barbosa, 2018	Twin-tandem	60 cm/min	Junta completa, passe único, penetração máxima de 25 mm, uso de arame frio, chanfro.
Lafdani et al., 2014	Tandem	175 cm/min	Junta completa, dois passes, penetração por passe: 7 mm, espessura da chapa: 10 mm, chanfro.
Kiran et al., 2012	Tandem	105 cm/min	Cordões sobre chapa, passe único, penetração máxima de 9,63 mm, chanfro.
Farhat, 2007	Tandem	101,5 cm/min	Junta completa, dois passes, penetração por passe: 12 mm, espessura da chapa: 16 mm
Ribeiro et al., 2016	Tandem	53 cm/min	Junta completa, passes múltiplos, penetração completa, espessura da chapa: 20,5 mm

Mohammadijoo et al.,2015	Tandem	152,5 cm/min	Cordão sobre chapa, passe único, penetração completa, espessura da chapa: 13,4 mm, arame frio
--------------------------	--------	--------------	---

Fonte: Autoria própria, 2019.

A partir destes dados se construiu uma faixa de parâmetros operacionais que foram executados no processo de soldagem, tais parâmetros encontram-se na Tabela 7 para o processo twin arc e Tabela 8 para o processo tandem arc.

Tabela 7 - Parâmetros de soldagem do processo twin arc

Amostra	v (cm/min)	%Frio	Passe	I (A)	V (V)	Aporte (kJ/mm)	Observação
I0V60	60	0	1	900	29	2,61	Teste de corrente e tensão, sem arame frio
			2	900	29	2,61	
I20V55	55	20	1	980	32	3,42	Condição com 20% de arame frio
			2	980	32	3,42	
I70V55	55	70	1	980	32	3,42	Condição com 70% de arame frio
			2	980	32	3,42	
I20V40	40	20	1	980	32	4,70	Condição com 20% de arame frio
			2	980	32	4,70	
I70V40	40	70	1	980	32	4,70	Condição com 70% de arame frio
			2	980	32	4,70	
I0V40	40	0	1	980	32	4,70	Condição sem adição arame frio
			2	980	32	4,70	
IV70C60	70	(1)20% (2)70%	1	980	32	2,69	Chanfro 60°
			2	980	32	2,69	
IV70C45	70	(1)20% (2)70%	1	980	32	2,69	Chanfro 45°
			2	980	32	2,69	
IV60C60	60	20	1	980	32	3,14	Chanfro 60°
			2	980	32	3,14	

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 8 - Parâmetros de soldagem do processo tandem arc

Amostra	v(cm/min)	Passes	Lead		Trail		Aporte (kJ/mm)
			I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	
T160	160	1º Passe	950	33	650	38	2,10
		2º Passe	950	33	650	38	2,10
T140	140	1º Passe	950	33	650	38	2,40
		2º Passe	950	33	650	38	2,40
T120	120	1º Passe	950	33	650	38	2,80
		2º Passe	950	33	650	38	2,80

Fonte: Autoria própria, 2019.

Após minuciosa análise, optou-se por diversificar as taxas de arame frio no intervalo de 0 a 20% e de 70%, uma vez que não há evidências substanciais sobre o desempenho nessas porcentagens de utilização de arame frio, especialmente quando empregado em chanfros retos. Os trabalhos encontrados na literatura tratam, em sua grande maioria, de cordões sobre chapa e quando apresentam juntas, são com múltiplos passes (Barbosa, 2018; Castro, 2017; Farhat, Hanan, 2007; Kiran; Basu; De, 2012; Mohammadjoo *et al.*, 2015; Pepin, 2009; Ramakrishnan; Muthupandi, 2013; Ribeiro, 2015).

O primeiro experimento (I0V60) realizado foi para determinar os valores de tensão e corrente de soldagem que garantisse a penetração completa com apenas dois passes de solda, os valores iniciais foram determinados com base nas informações do corpo técnico da empresa executora da soldagem. A partir da amostra inicial, variou-se os valores de velocidade de soldagem e porcentagem de arame frio. Em três amostras dos corpos de prova com arame frio foi efetuado um chanfro em um dos lados para realizar o teste com velocidades mais altas e o resultado considerado positivo. Pois, é recomendado que em chapas de espessura superior a 9,5 mm seja realizado o chanfro para garantir a penetração completa (Kiran *et al.*, 2010; Marques; Modenesi; Bracarense, 2014).

Utilizando a variável tandem arc foram produzidas três amostras, com velocidades superiores as utilizadas na soldagem com um arame, valores médios de 80 cm/min (Farhat, H., 2007; Silva *et al.*, 2018). Nesta variante do processo é possível alcançar velocidades bem superiores aos utilizados no twin arc, mesmo apresentando aporte térmicos semelhantes ou até mesmo inferiores.

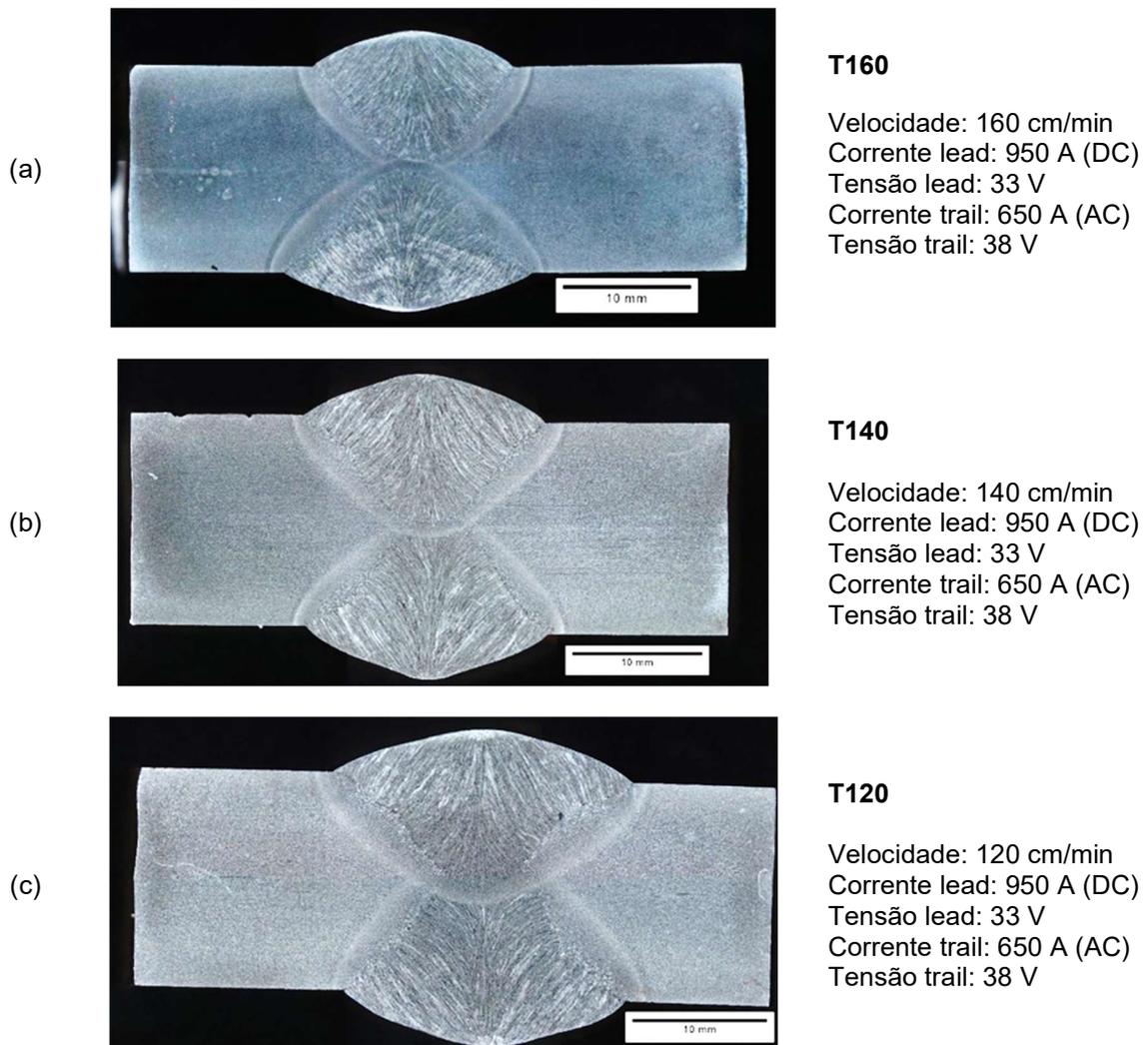
A análise das características geométricas é apresentada a seguir e irá demonstrar os resultados encontrados além de evidenciar quais os cordões foram considerados adequados para uso das variáveis de soldagem e que podem ser reproduzidos. Destaca-se, que os valores de velocidade alcançados e a janela operacional apresentada deverá ser considerada para soldagem com espessuras até 16 mm com o uso de chanfro reto e dois passes de solda. No entanto, adequações poderão ser realizadas para que os parâmetros possam ser usados em outras condições.

## 5.2 Análise de características geométricas – cordões em tandem arc

A Figura 19 ilustram os cordões produzidos pela técnica de soldagem tandem arc, no qual apenas a velocidade de soldagem foi modificada: 160 cm/min; 140 cm/min e 120 cm/min, enquanto os demais parâmetros de soldagem foram mantidos inalterados.

O cordão da Figura 19-a não apresentou penetração completa, enquanto os cordões da Figura 19-b e Figura 19-c exibiram penetração completa com sobreposição entre os cordões de passe 1 e passe 2. A redução da velocidade de soldagem propiciou maior aporte térmico ao cordão de solda, prolongando o tempo de exposição à energia de soldagem e resultando em uma penetração mais acentuada, conforme observado nos estudos realizados de Kiran et al., (2012); Farhat (2007); Sharma et al., (2018); Singh et al. (2016).

Figura 19 - Macrografias cordões de solda em tandem arc (a) T160; (b) T140; (c) T120



Fonte: A autoria própria, 2019.

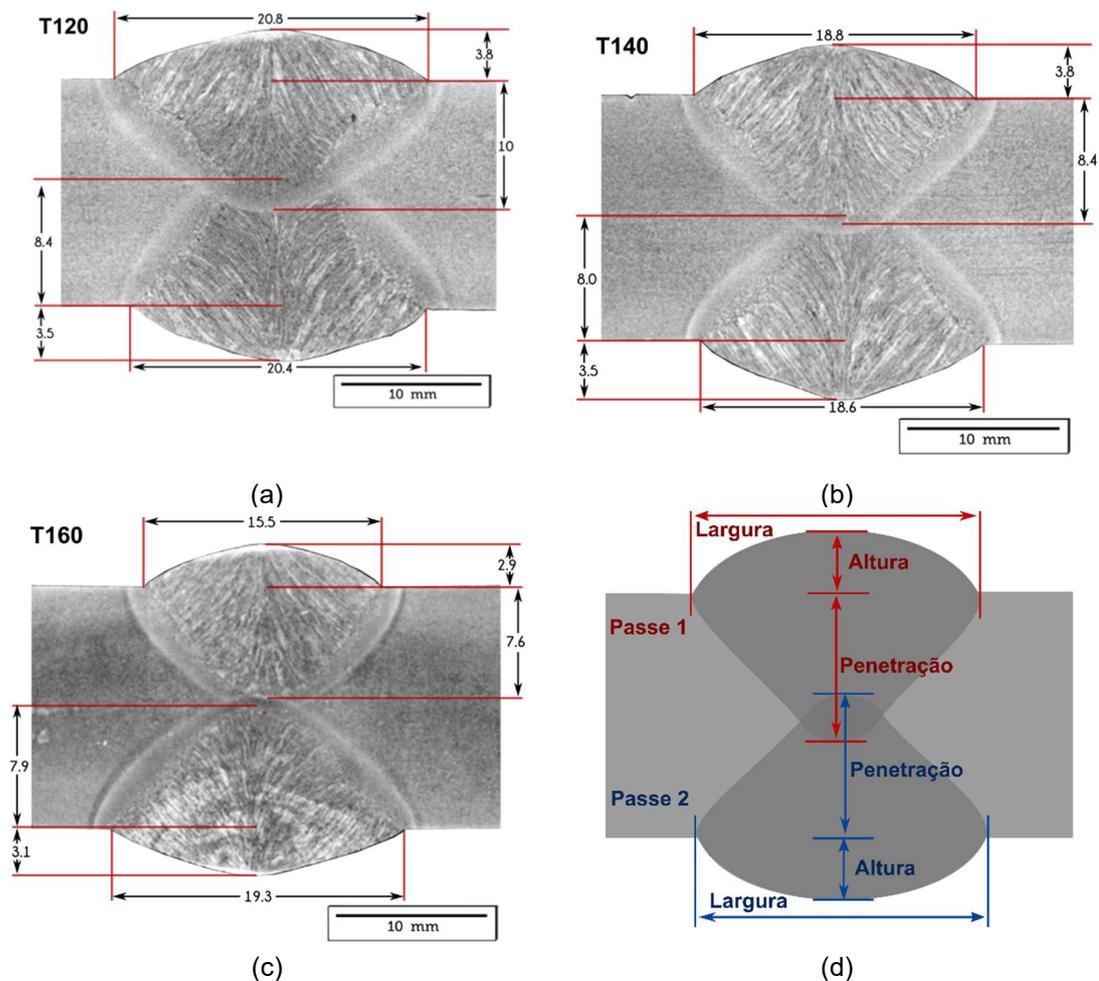
Os valores medidos para a altura de reforço, penetração e largura de cada cordão estão apresentados na Tabela 9 e representados pela Figura 20.

Tabela 9 - Parâmetros geométricos dos cordões de solda: largura; penetração e reforço

Amostra	Passe	Largura (mm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)
T160	1	15,5 ± 0,4	7,6 ± 0,2	2,9 ± 0,1
	2	19,3 ± 0,9	7,9 ± 0,3	3,1 ± 0,2
T140	1	18,8 ± 0,7	8,4 ± 0,1	3,8 ± 0,3
	2	18,6 ± 0,5	8,0 ± 0,4	3,5 ± 0,2
T120	1	20,8 ± 0,8	10,0 ± 0,3	3,8 ± 0,2
	2	22,4 ± 0,5	8,4 ± 0,2	3,5 ± 0,1

Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 20 - Macrografias transversais dos cordões das amostras: (a) T120; (b) T140; (c) T160; (d) esquema representativo das medidas da junta, todas as unidades em mm.



Fonte: O autor, 2021.

Dado o uso de chapas de 16 mm, a sobreposição adequada entre os cordões requer uma penetração média superior a 8 mm, correspondendo à metade da espessura

total. Vale ressaltar que esse limite mínimo pode aumentar significativamente em casos de desalinhamento substancial entre os cordões opostos, devido à maior distância diagonal a ser percorrida. Contudo, é importante destacar que tal fenômeno não foi observado em nenhuma das uniões analisadas.

A descontinuidade de falta de penetração identificada na junta T160 frequentemente compromete significativamente o desempenho mecânico das uniões soldadas, como indicado por Messer (2019). Para evitar essa falta de penetração em processos de Soldagem por Arco Submerso (SAW) de alta velocidade, é comum adotar a prática de preparar as peças por meio de chanfros angulares. Essa abordagem possibilita o aproveitamento das elevadas taxas de deposição, exigindo menos em termos de penetração. No entanto, é importante destacar que a usinagem dos chanfros implica em custos adicionais de recursos durante as operações (Layus et al., 2014; Ferrari, 2019). Portanto, estratégias para aumentar a produtividade que não dependem da usinagem de chanfros como requisito são particularmente vantajosas.

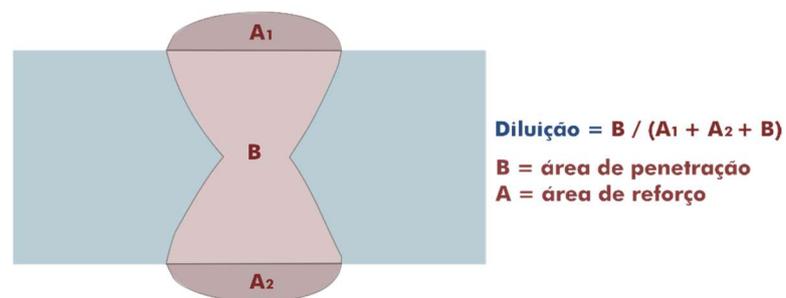
Conforme evidenciado na Figura 20 – (c), a condição T160 não demonstrou uma penetração completa, nem tampouco uma sobreposição efetiva entre os cordões de cada passe. Este resultado sugere que a elevada velocidade de soldagem ocasionou um aporte térmico insuficiente, resultante do tempo de interação reduzido entre a fonte de calor e o metal a ser fundido e incorporado à poça de fusão. Isso limitou o fluxo de calor e de metal fundido para o interior da junta. O mesmo efeito foi encontrado no trabalho de Farhat (2007), que por sua vez, avaliou o efeito da velocidade de soldagem e número de arames na qualidade do cordão de solda. O incremento da velocidade de soldagem, em seus experimentos, causou redução na largura do cordão de solda, reforço, profundidade de penetração, ângulo de contato, área de deposição, área total da solda e tamanho do ZTA na maioria das soldagens. Pode-se dizer que isso ocorre, pois se a velocidade de deslocamento aumenta, dessa forma o tempo para os processos de fusão e solidificação diminuem (Farhat, Hanan, 2007; Sharma; Maheshwari; Singh, 2019).

Velocidades de soldagem mais elevadas, como na condição de soldagem T160, resultam em um tempo mais curto para os fenômenos de fusão e solidificação, uma vez que a exposição à energia de soldagem disponível é mais breve (Sharma et al., 2019; Shen et al., 2012). Em contrapartida, a condição de maior aporte térmico, T120, exibiu uma boa penetração e uma extensa sobreposição entre os cordões de solda

em seu perfil macrográfico. Assim como encontrados nos trabalhos de (Farhat, Hanan, 2007; Gunaraj; Murugan, 2002; Ribeiro, 2015), a redução da velocidade de soldagem causa uma quantidade maior de fusão de arame e metal de base, os quais permanecem líquida por mais tempo, permitindo penetração suficiente, maior taxa de deposição.

Embora os resultados obtidos por Sharma (2019) sugiram uma leve redução na diluição com o aumento do aporte térmico, os valores desse parâmetro não exibiram variações significativas entre os diferentes níveis de aporte térmico investigados, em consonância com as descobertas de Shen (2012). Independentemente das três condições de soldagem analisadas, a diluição manteve-se constantemente em torno de 67,1%, com um desvio padrão de 1,78%. A estabilidade desse parâmetro diante de variações substanciais no aporte térmico - 17% e 33% - pode ser atribuída à relação proporcional entre as variações nas áreas de penetração e reforço. A Figura 21 ilustra as seções dos perfis das juntas utilizadas nos cálculos de diluição, área de penetração e área de reforço.

Figura 21 - Área de penetração, área de reforço e diluição, calculadas a partir do perfil das juntas.



Fonte: O autor, 2021.

O aumento dos valores de reforço, particularmente na largura dos cordões de solda, foi observado como um efeito decorrente da redução da velocidade e dos correspondentes aumentos de energia fornecido. Isso resultou na expansão da área ocupada pela região soldada na seção transversal, especialmente quando amostras de velocidade de soldagem mais baixas foram consideradas. Este fenômeno é frequentemente associado ao aumento das zonas termicamente afetadas e ao incremento do reforço, conforme documentado por Moeinifar (2011) e Sailender (2019).

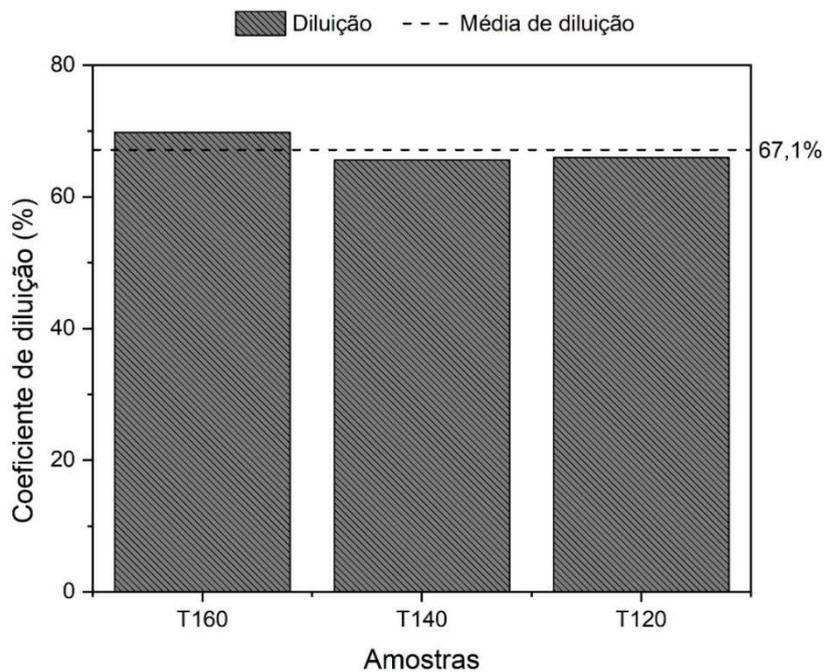
A distribuição dos valores dos parâmetros geométricos ao longo das amostras, conforme apresentada na Tabela 10 e Figura 22, valida as observações feitas nos estudos de Shen e Sharma. Esses resultados evidenciam que os incrementos no aporte térmico exercem um impacto positivo na formação do reforço, na largura e a penetração dos cordões de solda obtidos (Shen et al., 2012; Sharma et al., 2019).

Tabela 10 - Valores de área de reforço, área de penetração e diluição dos cordões de solda

Amostra	Passe	Área de penetração (mm)	Área do reforço (mm)	Diluição (%)
T160	1	73,92	30,06	71,09
	2	83,43	38,34	68,52
T140	1	85,22	44,59	65,65
	2	84,27	44,24	65,58
T120	1	114,49	53,77	68,05
	2	92,61	52,42	63,86

Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 22 - Valores de diluição por cordão de solda e passe



Fonte: Autoria própria, 2019.

Com o aumento do aporte térmico houve o incremento dos valores de área de penetração e reforço, conforme a Tabela 10. Embora apresente maiores valores com

a redução da velocidade, a diluição não apresentam variação significativa. Isso ocorre por que há aumento proporcional tanto na área de penetração como na área de reforço. A redução da velocidade de soldagem ocasionou um aumento na área do reforço conforme observado na Tabela 10. Para Shen et. al. (2012), a diluição varia muito pouco com o incremento do aporte térmico do mesmo modo que aconteceu com as amostras estudadas. Os valores de diluição média encontradas para o estudo deste mesmo autor foram em média de 57% para valores de aporte térmico maiores que os utilizados nesse estudo, a valor de diluição foi ligeiramente menor que a média calculada para as amostras desse trabalho. No geral, reforço, penetração e largura do cordão aumentam com o aporte térmico enquanto os valores de diluição permanecem praticamente inalterados (Gunaraj; Murugan, 2002; Narang *et al.*, 2012; Shen; Oguocha; Yannacopoulos, 2012; Singh; Shukla, 2016).

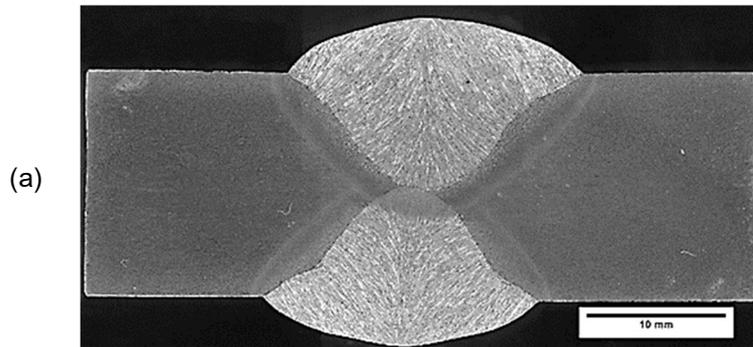
Ao analisar a geometria dos cordões nas três juntas soldadas pelo processo SAW-T, observa-se que apenas a junta T120, fabricada com uma velocidade de soldagem de 1200 mm/min, demonstrou estar livre de defeitos de falta de penetração. Por outro lado, as juntas T140 e T160 não atendem aos requisitos para aprovação em procedimentos de qualificação de soldas, devido à presença identificada de falta de penetração.

O conjunto internacional de normas ASME IX aborda o defeito de falta de penetração. Em seu item QW-191.1.2.2, que trata dos testes de qualificação de soldas, há sugestões para lidar com a presença desse defeito. De acordo com as diretrizes, os responsáveis pela qualidade de um processo de soldagem têm a autoridade para reprovar qualquer junta produzida caso os ensaios não destrutivos apontem a presença de trincas ou zonas vazias decorrentes de penetração ou fusão incompletas (The American Society of Mechanical Engineers, 2017).

### **5.3 Análise de características geométricas - cordões em twin arc**

As figuras abaixo representam os cordões produzidos pela variável de soldagem twin arc. Houve variação da porcentagem de adição de arame frio e da velocidade de soldagem.

Figura 23 - Macrografias cordões de solda em tandem arc (a) I60AF0; (b) I55AF20; (c) I55AF70; (d) I40AF20; (e) I40AF70; (f) I40AF0

**I0V60**

% AF: 0 V: 60 cm/min

Tensão: 29 V

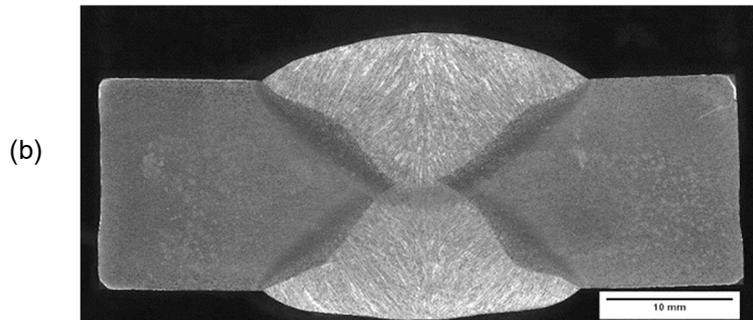
Corrente: 900<sup>a</sup>

HI:

Diâmetro do arame: 2,5 mm<sup>2</sup>

Chanfro: reto

Arame 12.24

**I20V55**

% AF: 20 V: 55 cm/min

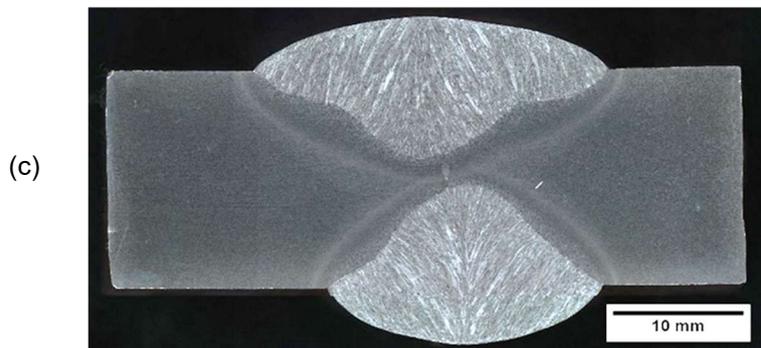
Tensão: 32 V

Corrente: 980 A

Diâmetro do arame: 2,5 mm<sup>2</sup>

Chanfro: reto

Arame 12.24

**I70V55**

% AF: 70 V: 55 cm/min

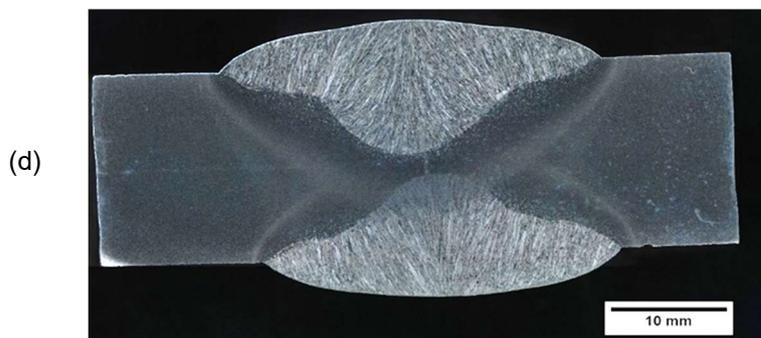
Tensão: 32 V

Corrente: 980 A

Diâmetro do arame: 2,5 mm<sup>2</sup>

Chanfro: reto

Arame 12.24

**I20V40**

% AF: 20 V: 40 cm/min

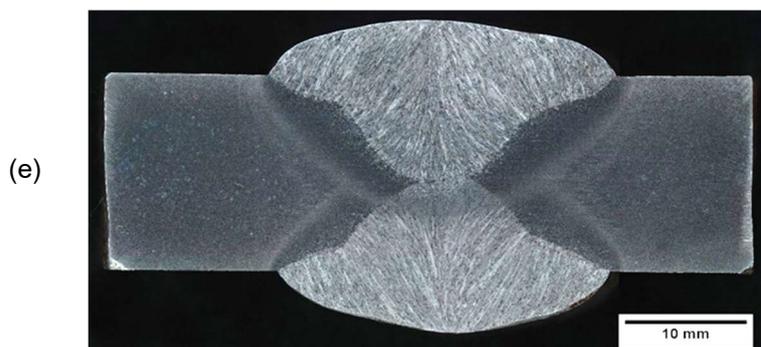
Tensão: 32 V

Corrente: 980 A

Diâmetro do arame: 2,5 mm<sup>2</sup>

Chanfro: reto

Arame 12.24

**I70V40**

% AF: 70 V: 40 cm/min

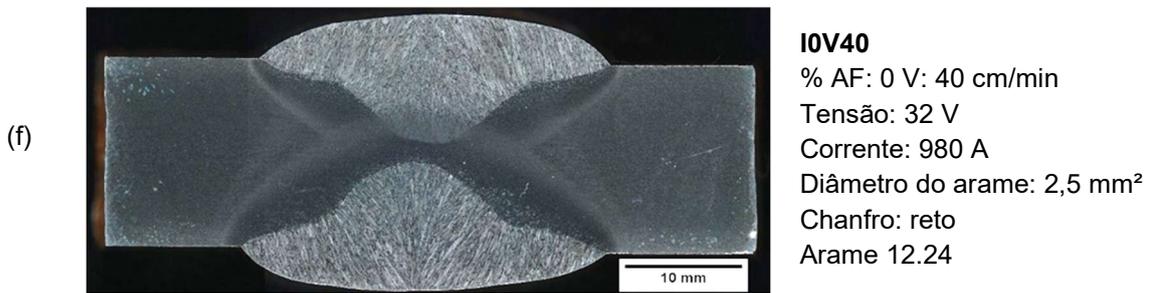
Tensão: 32 V

Corrente: 980 A

Diâmetro do arame: 2,5 mm<sup>2</sup>

Chanfro: reto

Arame 12.24

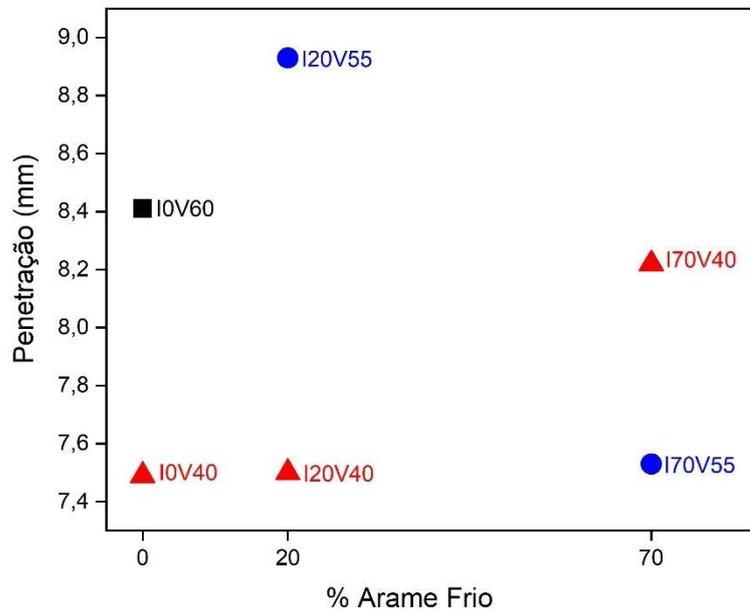


Fonte: Autoria própria, 2019.

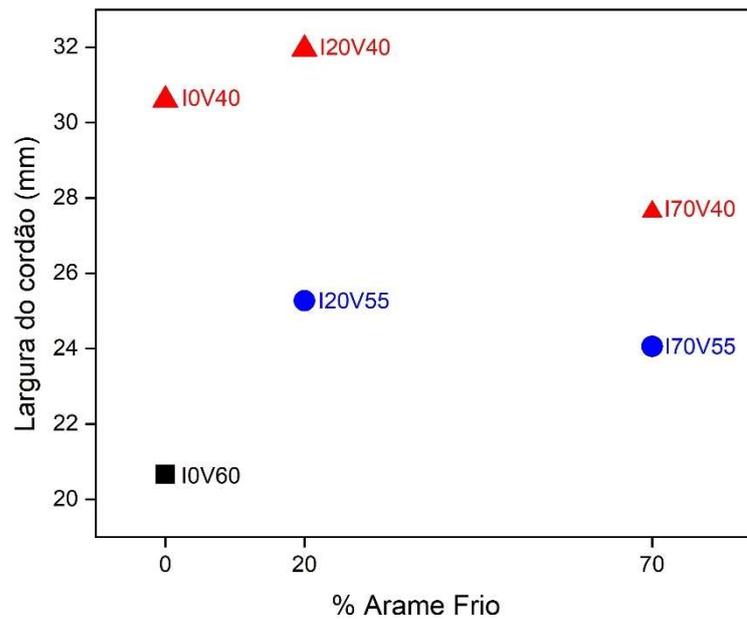
A amostra representada pela Figura 23-a foi efetuada com a finalidade de determinar os parâmetros base iniciais para execução das demais amostras.

Como observado na Figura 23, nem todos os cordões apresentam penetração completa, as Figuras 23-c; 23-d e 23-f exibem as amostras onde não houve penetração completa. Os valores de largura do cordão dos passes 1 e 2 não demonstram diferenças significativas. Os gráficos abaixo (Figura 24) demonstram a relação entre penetração e % arame frio, largura e % de arame frio.

Figura 24 - Gráficos de análise dimensional (a) Penetração versus adição de arame fio (b) Largura versus adição de arame frio.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Como observado na Figura 24-a, a penetração aumentou com a adição de arame frio de 20% para 70% para as amostras com velocidade de 40 cm/min, o que não ocorreu quando a contribuição do arame frio foi de 0% para 20%. A penetração reduziu com o aumento da razão de arame frio de 20% para 70% nas amostras com velocidade de 55 cm/min.

A Figura 24-b representa o efeito do arame frio na largura do cordão de solda. Pode-se afirmar que o aporte térmico influencia de forma mais significativa esse parâmetro do que a adição do arame frio. Com o aumento do aporte térmico há o aumento da largura do cordão (Figura 24), o que não se pode concluir ao certo se o aumento do percentual de arame frio, com o mesmo aporte relativo, reduz tal parâmetro.

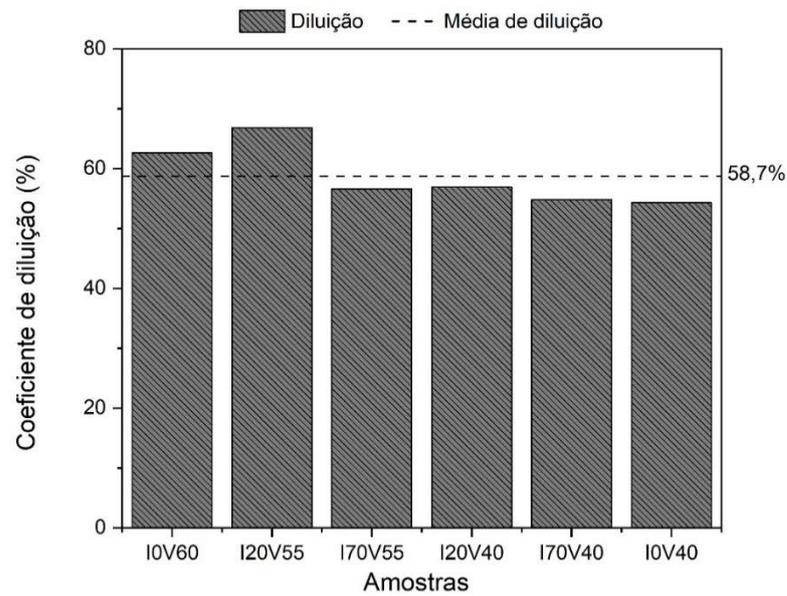
Para Cardoso (2018), com a redução do aporte térmico a energia para fusão dos materiais diminui e em consequência há perda na profundidade de penetração. Em seu trabalho, Cardoso Jr. et al. (2018) realiza a análise estatística sobre os efeitos do arame frio sobre os parâmetros geométricos dos cordões de aços inoxidáveis e conclui que há influência significativa na diluição, no entanto não há tendência clara na variação dos demais parâmetros. Este resultado parece ser consistente com os achados deste trabalho, onde o aumento da porcentagem de arame frio reduz a energia de soldagem e, conseqüentemente, a penetração dos cordões de solda. No

entanto, é importante notar que os resultados são inconclusivos em relação ao número de amostras utilizadas, sugerindo a necessidade de uma análise mais abrangente.

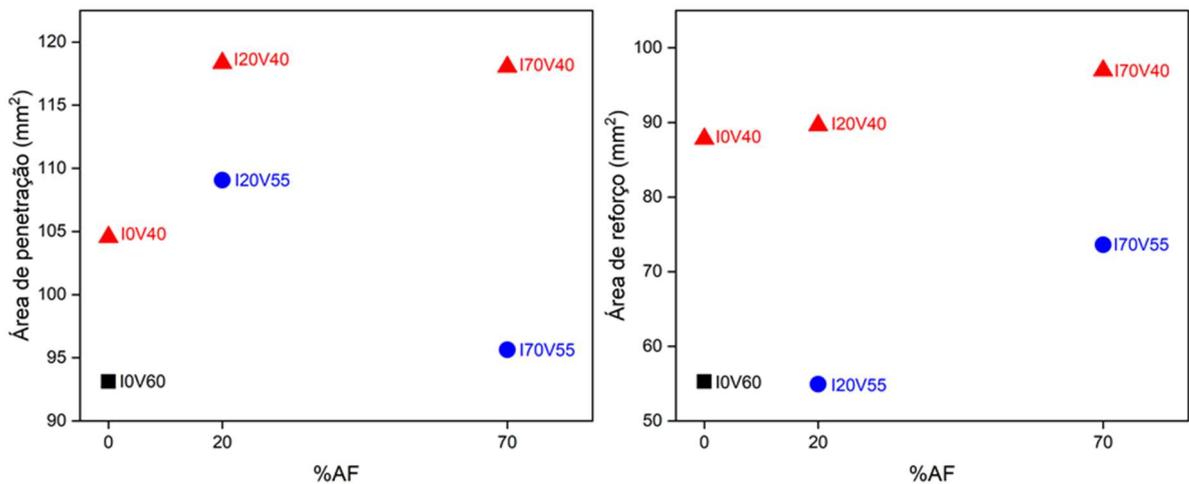
Os efeitos da adição de arame frio são apresentados nos gráficos da

Figura 25 e posteriormente discutidos sobre qual influência deste fator na área de penetração, área de reforço e o coeficiente de diluição.

Figura 25 - Análise dimensional do cordão de solda: (a) coeficiente de diluição (b) área de penetração e área de reforço



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, 2019.

O estudo conduzido por Barbosa et al. (2018) avaliou a influência de elevados aportes térmicos na microestrutura e nas características mecânicas da zona fundida na soldagem de um aço naval com a adição de arame frio. Assim como observado por Cardoso et al. (2018) e Castro (2017), concluiu-se que a adição do arame frio afeta principalmente a diluição. Segundo Xiang et al. (2016), a principal contribuição do arame frio é interferir no coeficiente de diluição, por meio de variações causadas na área de reforço e área de penetração. Mohammadijoo et al. (2015, 2017a) corroboraram esse comportamento em soldagens na configuração tandem arc com a adição de arame frio, destacando um aumento na produtividade devido ao acréscimo da taxa de deposição.

No entanto, esses autores ressaltam que a influência positiva da adição de arame frio na taxa de deposição é mais significativa quando as juntas soldadas são chanfradas. Esse benefício não se manifesta da mesma maneira quando as juntas apresentam chanfros retos, como no caso das juntas mencionadas. Com juntas de chanfro reto, o depósito aumenta na região do reforço de solda devido à menor capacidade de penetração, causada pela redução do aporte térmico efetivo.

De acordo com o gráfico da

Figura 25-a, podemos presumir que a diluição dos cordões não apresentou variação significativa. A média das diluições dos cordões é de  $58,7 \pm 5\%$ , taxas superiores as apresentados por Cardoso Jr (2018); Castro (2017) e Barbosa et al. (2018). Mesmo com o aumento da porcentagem de arame frio não houve alteração no coeficiente de diluição, o mesmo ocorreu com o aumento do aporte térmico, onde ocorreu uma leve redução porém permaneceu bem próximo da média geral.

Quando se analisa a

Figura 25-b que expõe a variação das área de penetração e de reforço pode-se inferir que:

Áreas de reforço:

- O aumento do percentual de arame frio causou aumento da área de reforço para as amostras com velocidade de 40 cm/min;
- O aumento foi mais considerável de 20% para 70% de arame frio (8% de aumento) contra 2% de aumento de 0% para 20%;

- Para as amostras com velocidade de 55 cm/min, o aumento foi aproximadamente 34%;
- Os maiores aportes térmicos proporcionaram maiores áreas de reforço.

#### Áreas de penetração:

- Para as amostras com velocidade de 40 cm/min, houve aumento de 0% para 20%, e houve uma estabilização da área de penetração de 20% para 70%;
- Nas amostras com velocidade de 55 cm/min, houve redução da área fundida com o aumento do percentual de arame frio;
- Os maiores aportes térmicos causaram maiores áreas de penetração.

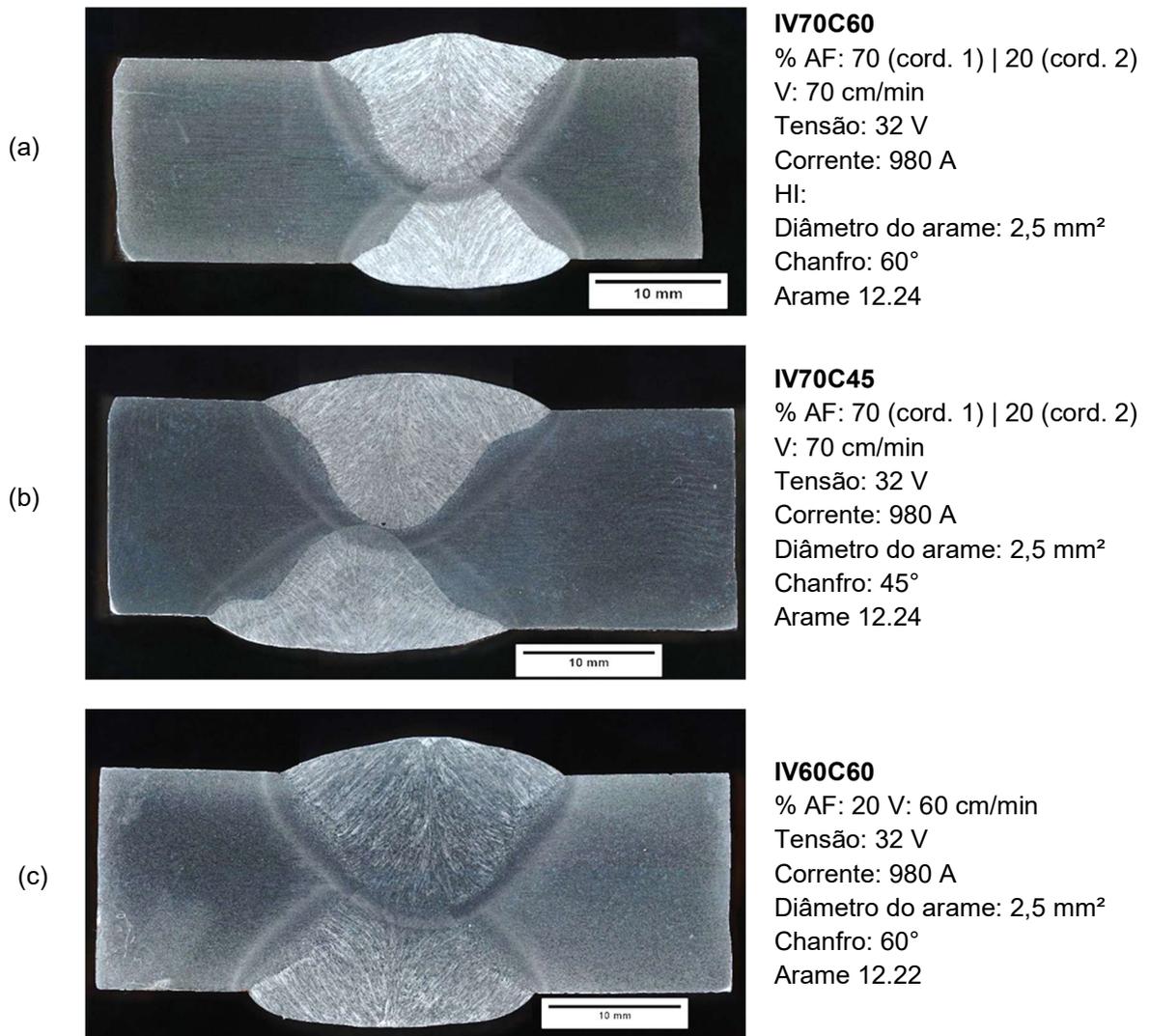
Cardoso Jr (2018, 2017) também observou o mesmo comportamento de aumento de áreas de penetração com aumento de arame frio, em seu trabalho ocorreu de forma mais significativa quando aumentou de 50% para 100%. Em relação às áreas de reforço, esse autor identifica uma clara tendência para o seu crescimento, especialmente ao considerar cordões sobre chapa. Este comportamento é semelhante ao observado em juntas com chanfro reto, como as amostras produzidas no presente estudo. Da mesma forma, a redução da velocidade resultou em aumento tanto nas áreas de penetração quanto nas áreas de reforço, de acordo com as conclusões do autor.

No contexto de cordões sobre chapa, uma maior porcentagem de arame frio não altera significativamente a área de penetração, apesar de apresentar uma tendência a reduzir com o aumento da contribuição do arame frio na poça de fusão. Dado que a área de penetração permanece inalterada e a área de reforço varia, é esperado que ocorra uma redução no coeficiente de diluição. Similarmente aos resultados de Cardoso Jr (2018, 2017), o comportamento observado nessas amostras não indica uma tendência para a redução da diluição, o que sugere uma consistência com o padrão de cordões com chanfro reto.

Como se esperava a área total aumenta com o acréscimo da taxa do arame frio e com o aumento do aporte térmico, sendo mais influenciado pelo aporte térmico, assim como relatados por Castro (2017) e Cardoso Jr (2018).

Figura 26 apresenta as macrografias dos cordões de solda com a presença de chanfro.

Figura 26 - Macrografias dos cordões de solda com a presença de chanfro



Fonte: Autoria própria, 2019

A existência do chanfro viabilizou a obtenção de uma penetração completa em todos os cordões, mesmo diante do desalinhamento observado, que possivelmente foi ocasionado por interferência magnética entre os arcos elétricos, ajustes de posicionamento de tochas, entre outros fatores. Além disso, ao utilizar o chanfro, foi possível empregar maiores velocidades de soldagem mantendo os demais parâmetros inalterados. Esses resultados evidenciam a eficácia do chanfro não

apenas na garantia da penetração adequada, mas também na superação de desafios como o desalinhamento, contribuindo para a otimização do processo de soldagem.

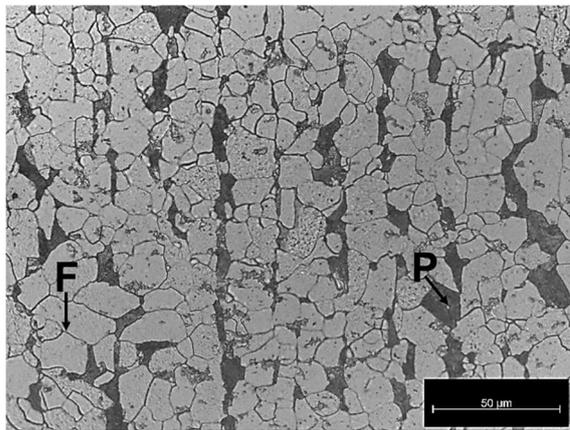
Na literatura buscada, em diversos trabalhos relacionados ao uso de twin arc, com ou sem a adição de arame frio, não se encontrou nenhum relato nenhum com uso de chanfro reto, a grande maioria ou tratava de deposições sobre chapa ou de espessuras superior a 16 mm com chanfros entre 30° a 60° e aberturas de raiz entre 1 a 5 mm (Barbosa *et al.*, 2018; Cardoso Junior *et al.*, 2018; Castro, 2017; Tušek; Suban, 2003; Tušek, 2000). Diferente das amostras apresentadas nesse trabalho, onde analisou a possibilidade de aplicação em chanfros retos e sem abertura de raiz, principalmente para a utilização na indústria de fabricação de tubos.

Após essa análise pode-se inferir que o uso do twin arc com adição de arame frio fica limitado a velocidades entre 40 a 60 cm/min com uso de porcentagem de arame frio abaixo 70% para espessuras de até 16 mm com dois passes, nas condições de soldagem utilizadas. Tais resultados podem ser alterados dependendo da espessura utilizada, uso de chanfro e o aumento de aporte térmico.

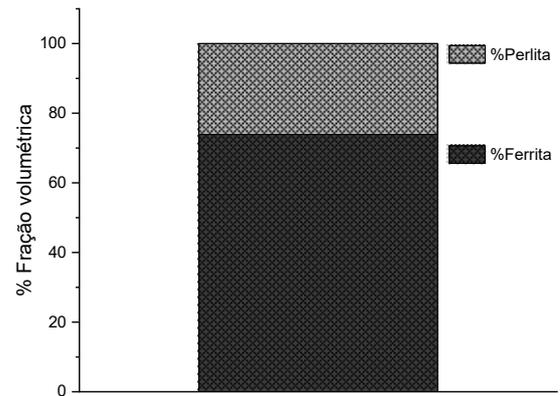
#### **5.4 Caracterização do metal de base**

O metal de base, ASTM A572 Gr. 50 apresenta microestrutura composta por bandeamento de ferrita e perlita, conforme pode ser observado na Figura 27. A estrutura bandada melhora as propriedades mecânicas do material, em especial à tenacidade a fratura (Krauss, 2003). As frações volumétricas das fases ferrita (F) e perlita (P), são respectivamente, 70,1% e 29,1%, conforme apresentado em gráfico da figura abaixo. A dureza média apresentada pelo material é de  $132,0 \pm 4,5$  HV.

Figura 27 - Metal de base A572 Gr. 50 (a) Microestrutura do metal de base (b) Fração volumétrica de fases: perlita e ferrita



(a)



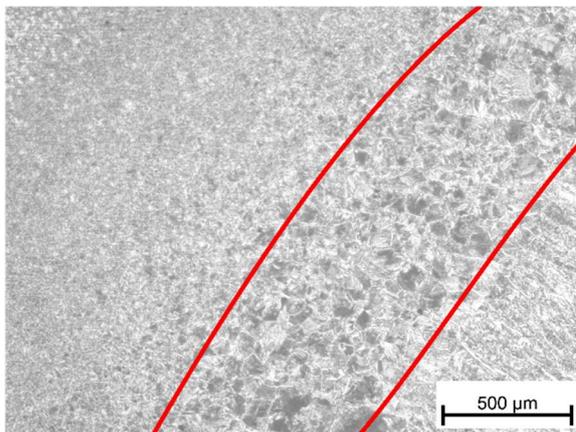
(b)

Fonte: Autoria própria, 2019.

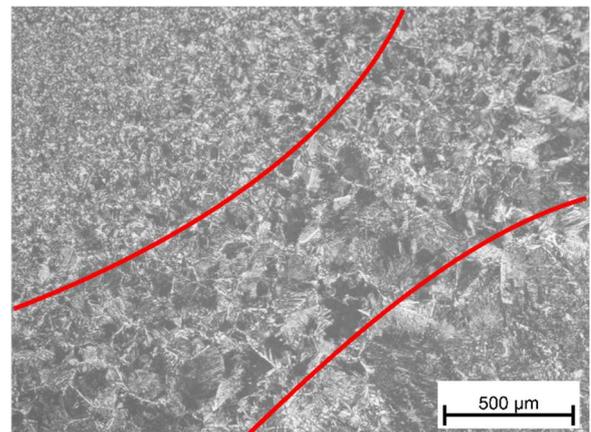
## 5.5 Análise Microestrutural Geral

Nesta seção serão apresentados os aspectos microestruturais dos cordões de solda nas regiões de zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA), especificamente, a região de grãos grosseiros. A Figura 28 apresenta as micrografias da região de transição entre ZF e ZTA.

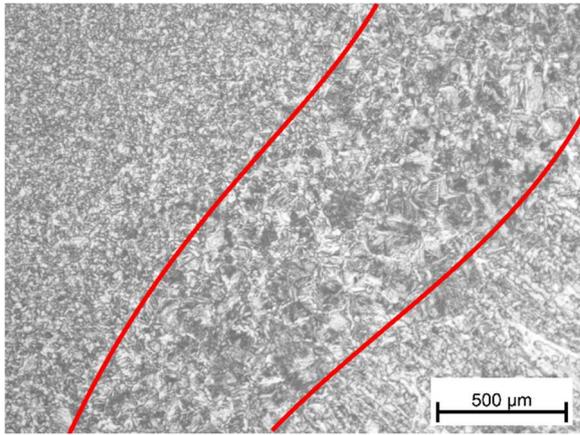
Figura 28 - Micrografias da região de transição dos cordões de solda (50×)



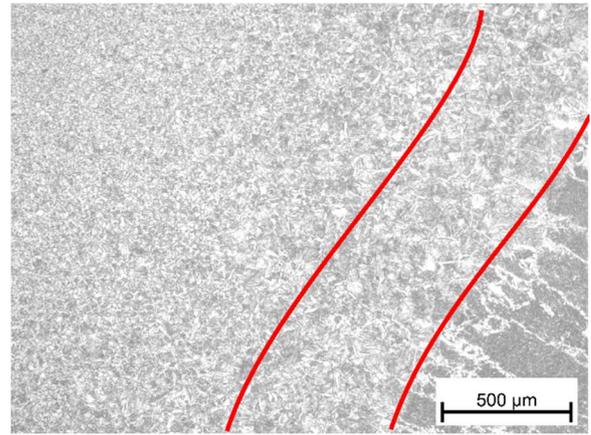
(a) T160



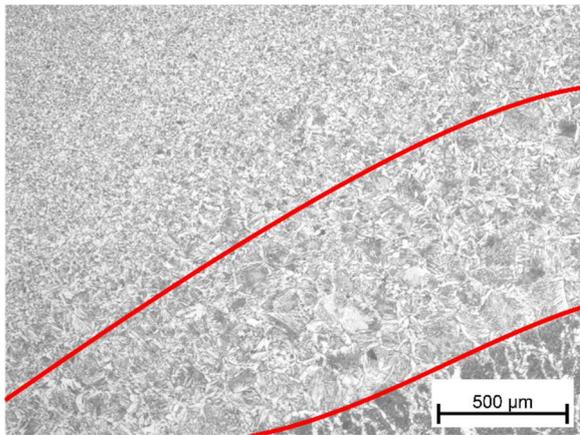
(b) T140



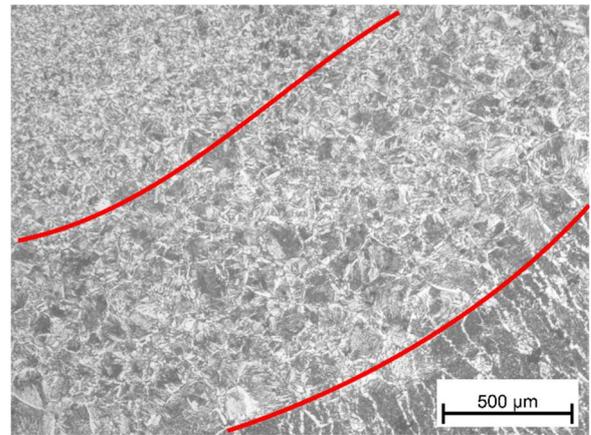
(c) T120



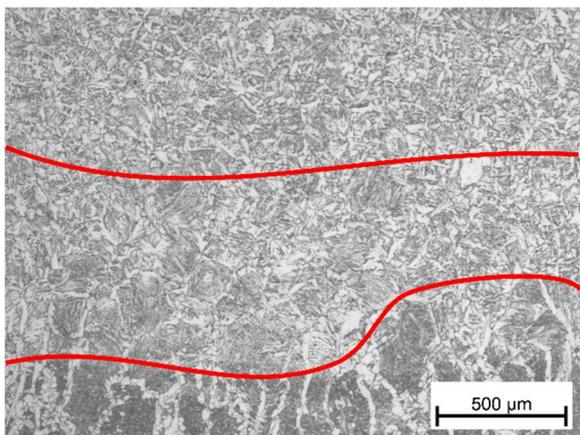
(d) I0V60



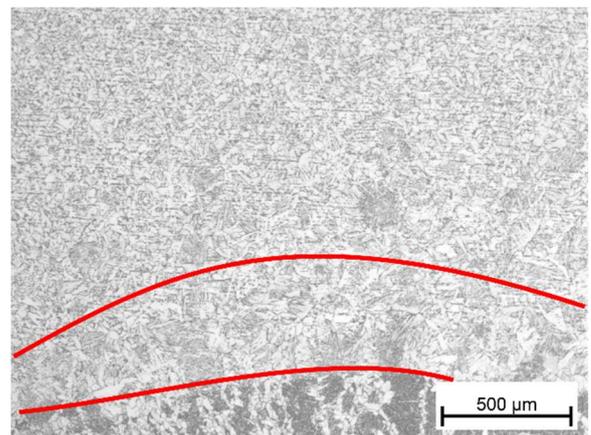
(e) I20V55



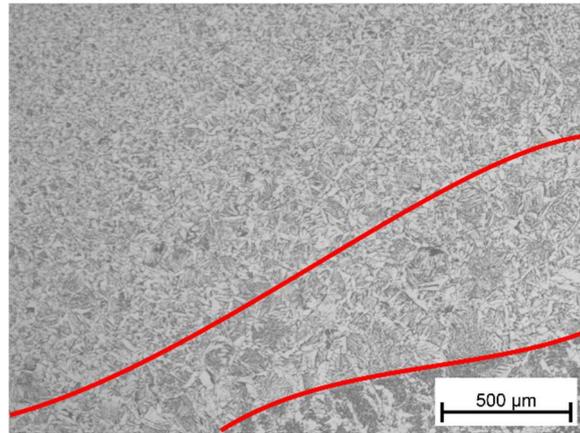
(f) I70V55



(g) I0V40



(h) I20V40



(i) I70V40

Fonte: Autoria própria, 2019

As Figuras 28-a, 28-b e 28-c representam a região de transição dos cordões soldados em tandem arc, é possível observar as sub-regiões da ZTA com distinção, principalmente a região de grãos grosseiros (GG) e de refino de grãos (RG). Por outro lado, quando observamos as Figuras 28-d, 28-e, 28-f, 28-g, 28-h e 28-i, as quais representam as cordões soldados por twin arc, pode-se observar a modificação da ZTA em comparação com a ZTA dos cordões produzidos em tandem arc. Neste caso, as sub-regiões tornam-se mais difíceis de identificar.

A discussão por região será apresentada nas próximas sessões.

## 5.6 Análise Microestrutural – Tandem Arc

A Figura 29 apresenta a microestrutura das regiões de grãos grosseiros da ZTA (Zona Termicamente Afetada) de cada cordão soldado. Ao observar as distinções microestruturais entre a condição de maior aporte térmico na Figura 29- (a), a condição intermediária na Figura 29- (b) e a condição de menor aporte térmico na Figura 29- (c), nota-se que aumentos na quantidade de calor fornecido à junta soldada durante o processo resultam em grãos de tamanho maior, como detalhado na Tabela 11.

Ainda assim, as variações provocadas na taxa de resfriamento não resultaram na presença de microconstituintes distintos em cada Zona Termicamente Afetada Granular (ZTAGG) analisada. A microestrutura predominante na ZTAGG dos três cordões foi identificada como ferrita de Widmanstätten ( $\alpha_W$ ), juntamente com ferrita

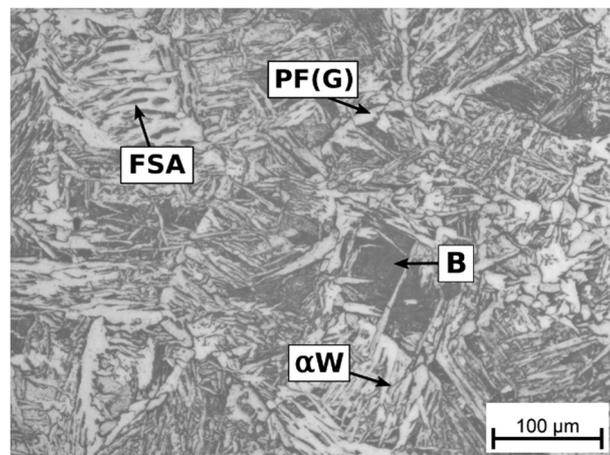
com segunda fase alinhada (FSA), bainita (B) e ferrita primária de contorno de grão (PF(G)).

Embora as quatro microestruturas tenham sido observadas em todas as ZTAGG das juntas soldadas, nota-se que a proporção de cada uma na composição microestrutural da ZTA varia entre os três cordões de solda. Essa variação sugere que as condições térmicas distintas durante o processo de soldagem influenciaram a formação e a distribuição relativa dessas microestruturas na ZTA.

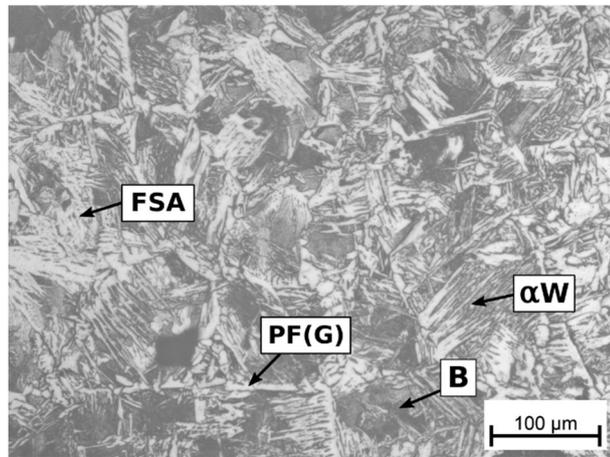
A morfologia da ferrita de Widmanstätten, originada nas ferritas de contorno de grão, foi observada passando por mudanças em função do nível de velocidade de soldagem (Santos et al., 2014). Notou-se que, à medida que o aporte térmico aumentava, as ripas de ferrita tornavam-se mais espessas. Outra diferença notável entre as microestruturas da Zona Termicamente Afetada (ZTA) foi a disparidade nos tamanhos médios de grão, sendo que este valor foi menor em T160, devido ao aporte térmico reduzido. Contudo, essa diferença é de baixa magnitude, sendo de 5% entre T120 e T140, e de 9% entre T140 e T160.

Para dimensionar o tamanho médio de grão na região de grãos grosseiros das ZTAs, foram utilizadas micrografias e o método de interceptos lineares, conforme definido pela norma ASTM E-112-12. O procedimento foi realizado com auxílio do software de acesso livre Goitacá. Os valores médios obtidos para tamanho de grão nas ZTAs encontram-se apresentados na Tabela 11.

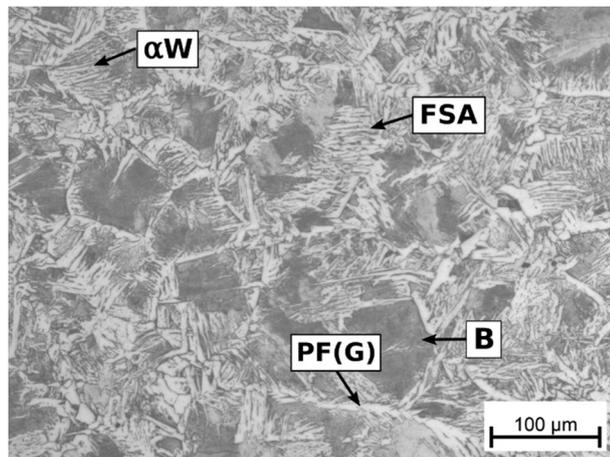
Figura 29 - Micrografias da Região de Grãos Grosseiros nas ZTAs (a) T120; (b) T140 e (c) T160.



(a) T120



(b) T140



(c) T160

Fonte: O autor, 2021.

Tabela 11 - Tamanho médio de grão na ZTA dos cordões soldados por SAW-T.

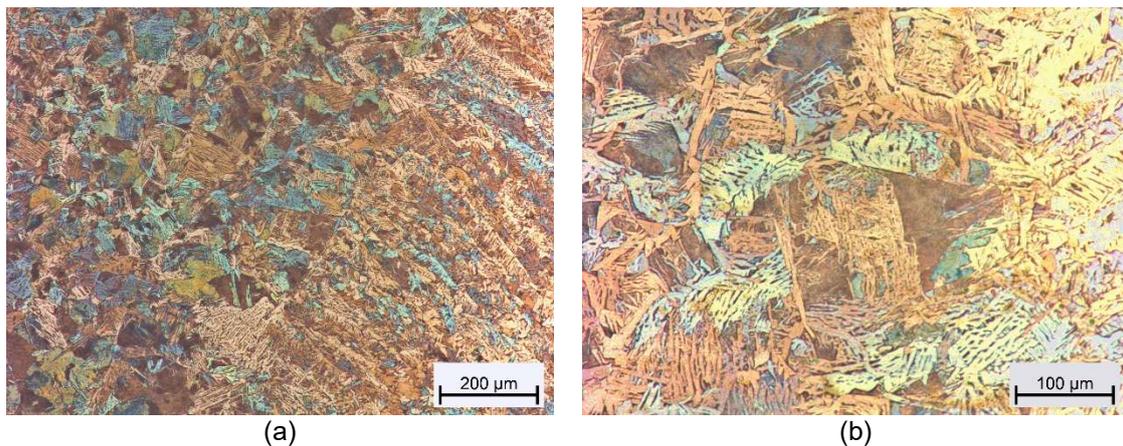
Amostra	Cordão	Tamanho de grão ( $\mu\text{m}$ )
T120	1	$154 \pm 14$
T140	1	$147 \pm 17$
T160	1	$134 \pm 19$

Para verificar a presença de martensita na Zona Termicamente Afetada (ZTA) de T160, foi realizado um ataque químico com reagente de Le Pera. Devido à ação do reagente na superfície da amostra, estruturas martensíticas e austeníticas são observadas em tonalidades de branco na microscopia óptica. Em contraste, as ferritas aparecem em tons de azul a verde, e a bainita é visualizada na cor.

Essa verificação foi motivada pela semelhança entre a bainita observada e certas morfologias de martensita. Além disso, em trabalhos anteriores, com condições comparáveis de aporte térmico, processo de soldagem e metal de base, foi identificada a presença de martensita austenítica (M/A) (Moeinifar, 2011; Jorge et al., 2021). A condição T160 foi selecionada para essa análise por apresentar as maiores taxas de resfriamento e, portanto, a maior probabilidade de conter martensita ou martensita revenida. Esses microconstituintes foram identificados em processos semelhantes relatados na literatura (Beidokhti, 2014; Moon, 2011).

A suspeita surgiu devido ao fato de que taxas de resfriamento elevadas podem levar o material a temperaturas abaixo daquelas em que a martensita se forma, antes que as transformações de formação de ferrita acicular e bainita possam ser concluídas. As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 30.

Figura 30 - Micrografias de T160, após ataque com reagente Le Pera. O ataque realça a distinção entre os constituintes ferríticos e bainíticos. A interface entre ZF e ZTA é vista em (a).



Fonte: O autor, 2021.

Conforme ilustrado na Figura 30, a análise microestrutural não revelou a presença de microconstituintes martensíticos. Pelo contrário, as maiores taxas de resfriamento influenciaram positivamente a microestrutura resultante. Na Figura 30- (a), observa-se que as porções azuis ocupam mais espaço à medida que se afastam do centro do cordão. Isso pode ser justificado pelo fato de que as taxas de resfriamento diminuem com a distância ao centro, favorecendo a formação de morfologias de ferrita em detrimento das bainíticas.

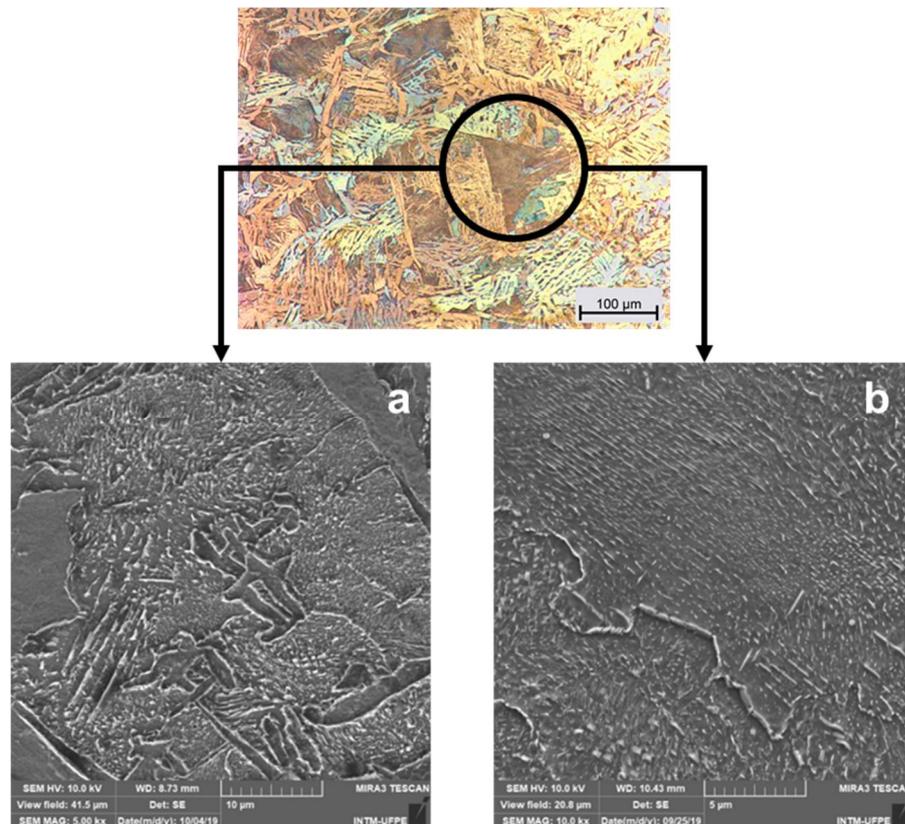
A bainita, identificada na análise de microscopia óptica, estava distribuída ao longo das Zonas Termicamente Afetadas Grão Grosseiros (ZTAGGs) na forma de ilhas, contidas no interior dos grãos.

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu visualizar a morfologia da bainita em mais detalhes, como mostrado na

Figura 31. Destaca-se o alto grau de refinamento da estrutura, composta por feixes de carbonetos alongados de dimensões nanométricas e altamente dispersos na matriz ferrítica, conforme indicado na imagem de microscopia contida na

Figura 31 e nos respectivos aumentos em imagens de MEV (Eilises et al., 2008; Santos et al., 2014).

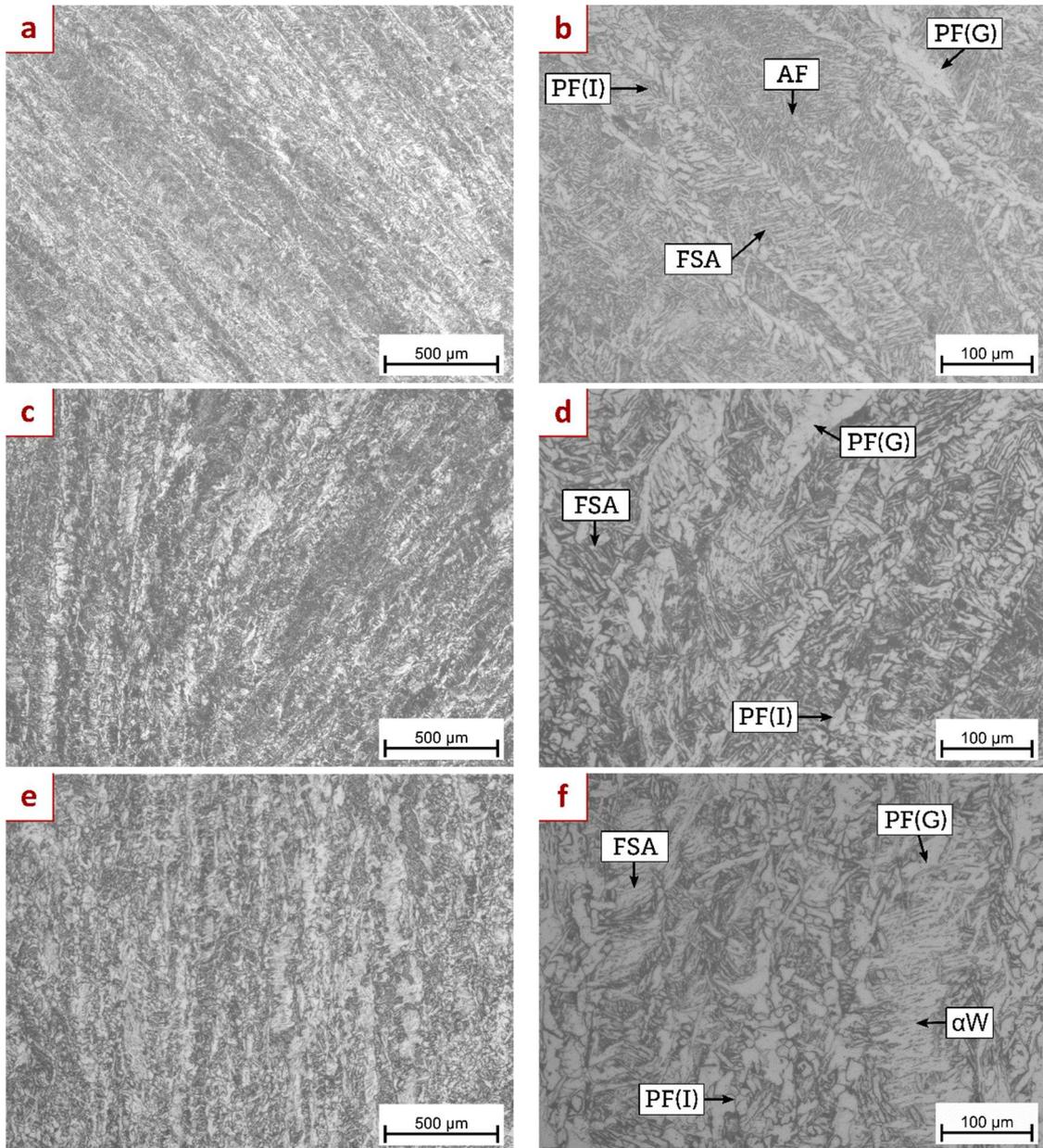
Figura 31 - Imagem de Microscopia eletrônica de varredura evidenciando a presença de bainita na ZTA de T160. (a) Aumento de 5 mil vezes. (b) Aumento de 10 mil vezes.



Fonte: O autor, 2021.

A microestrutura presente na zona fundida das juntas obtidas é predominantemente composta por morfologias de ferrita, especialmente a ferrita acicular (AF), ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) e ferrita com segunda fase alinhada (FSA). As micrografias de menor magnificação apresentam o perfil colunar de crescimento característico de Zonas Fundidas (ZFs) de aços carbono e aços de alta resistência e baixa liga (Silva et al., 2018; Lippold, 2015; Lan et al., 2012). As microestruturas características da ZF de cada cordão estão dispostas na Figura 32.

Figura 32 - Imagens de microscopia óptica – com aumentos de 50 vezes em a, c, e e 200 vezes em b, d, f – das microestruturas de T160 (a, b), T140 (c, d) e T120 (e, f).



Fonte: O autor, 2021.

A bainita (B) e a ferrita acicular (AF) formam-se por mecanismos de transformação similares, diferindo principalmente em seus sítios de nucleação. A ferrita acicular (AF) nucleia em inclusões presentes no interior de grãos austeníticos, enquanto a bainita nucleia em contornos entre grãos austeníticos ou entre grão ferrítico e grão austenítico. A nucleação de AF depende, ainda, da compatibilidade cristalográfica com as inclusões presentes (ABSON, 2018; GUNARAJ e MURUGAN, 2008; LIPPOLD, 2015; KRAUSS, 2015). O crescimento de AF é uma transformação

por distorção cristalina, acompanhada de deformação plástica e leva à alta densidade de discordâncias na microestrutura, contribuindo para sua resistência mecânica (BEIDOKHTI, 2014).

Durante a solidificação, enquanto houver contornos disponíveis, a bainita é favorecida cineticamente em relação à ferrita acicular (AF). Entretanto, uma vez que a ferrita alotriomórfica tenha se formado ao longo dos contornos de grão, a cinética de formação da ferrita acicular se favorece (Babu, 2004; Santos et al., 2014, Krauss, 1995).

A presença predominante de ferrita acicular (AF) nos interiores de grão e a extensiva presença de ferrita primária de contorno de grão (PF(G)) ao longo da Zona Fundida (ZF) indicam que, durante o resfriamento, formou-se uma camada de PF(G) ao longo dos contornos de grão antes que se atingisse a temperatura de nucleação de bainita (B) ou ferrita acicular (AF). Com isso, a formação de AF nas inclusões intragranulares tomou preferência frente à nucleação de bainita. A formação de inclusões devido à dissolução de elementos mais leves nas temperaturas mais altas do processo de soldagem é outro fator de favorecimento da transformação em ferrita acicular, conforme fenômeno discutido por Babu (Babu, 2002; 2004).

Em T120, após a ocupação dos contornos pela PF(G), as taxas de resfriamento mais baixas possibilitaram a nucleação e o crescimento da ferrita de Widmanstätten ( $\alpha_W$ ), evidenciada no item “f” da Figura 32, a partir da PF(G). Em contraste, em T140 e T160, essa estrutura teve menos tempo para se desenvolver, já que a temperatura na qual a formação de AF prevalece foi alcançada mais rapidamente.

Morfologicamente, a ferrita acicular apresenta, em cada ripa unitária, um comprimento maior em relação à sua seção transversal em uma de suas direções, conferindo-lhe o formato de agulhas quando observada em duas dimensões. Suas unidades morfológicas surgem com orientação aleatória, formando conjuntos entrelaçados de maneira caótica. Essa morfologia característica resulta de repetidas transformações por cisalhamento na estrutura cristalina da fase originária, o que leva ao rápido crescimento adifusional de microconstituintes AF previamente nucleados. Esse mecanismo cinético é análogo ao observado em bainitas, mas difere deste por apresentar múltiplas direções de crescimento radial desordenado. (Loder, 2016; Shen, 2012; Santoa et al., 2014).

Ao comparar as micrografias de cada junta, é possível observar que o aumento na velocidade resulta em uma maior quantidade de ferrita acicular, conforme indicado

na Tabela 12. Dado o impacto positivo desse microconstituente nas propriedades mecânicas do material, especialmente na tenacidade e resistência mecânica, a tendência observada mostra-se promissora para a utilização de velocidades mais elevadas durante a soldagem de SAW-T. Esse fenômeno é atribuído à maior velocidade de resfriamento associada ao aumento da velocidade e, conseqüentemente, à redução do aporte térmico, favorecendo a formação de microestruturas aciculares, como a ferrita acicular (BABU, 2004; SILVA et al., 2018; FARHAT, 2007; KIRAN et al., 2015).

Tabela 12 - Porcentagem de Ferrita Acicular (AF) nos cordões de solda

Amostra	% AF
T120	28,1%
T140	51,6%
T160	57,9%

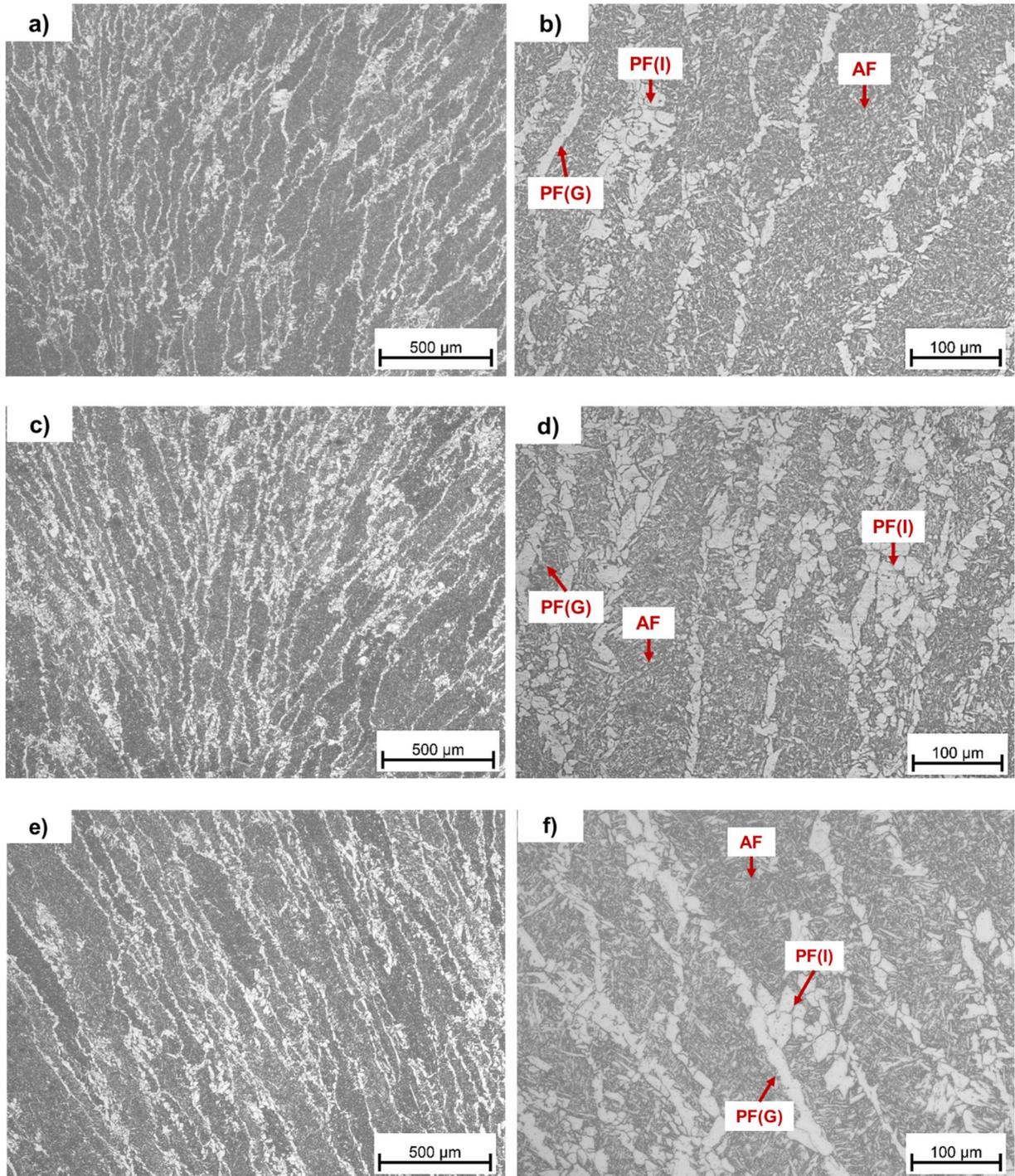
Fonte: O autor, 2021.

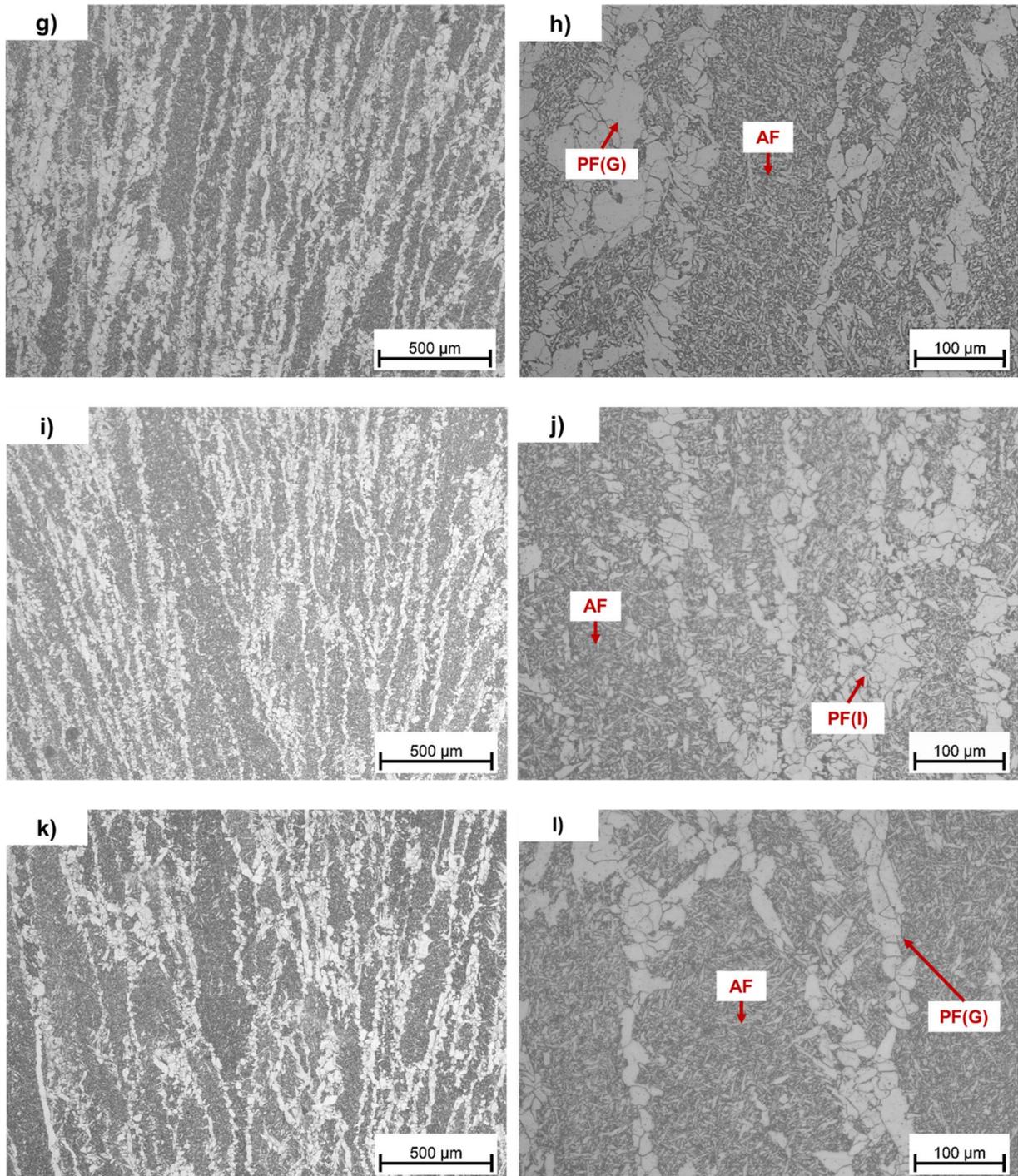
Reduções na velocidade de soldagem promovem uma maior formação de ferrita de contorno de grão, uma microestrutura considerada indesejável. Além disso, períodos mais prolongados em temperaturas elevadas e resfriamentos mais lentos, ambos observados em aportes térmicos mais elevados, propiciam o crescimento de grãos e reduzem a taxa de nucleação (Thewlis, 2004; Barbosa, 2018; Babu, 2004). O aporte térmico é o principal fator de influência no tamanho do grão austenítico prévio e na largura das ripas de ferrita acicular (Viano, 2000). Esses dois parâmetros são afetados por diminuições na taxa de resfriamento resultantes de aportes térmicos maiores, o que geralmente leva a uma microestrutura mais grosseira.

## 5.7 Análise Microestrutural – Twin Arc

A Figura 33 apresenta as micrografias da zona fundida produzidas por twin arc.

Figura 33 - Microscopia ótica da zona fundida dos cordões twin arc: a) e b) I0V60; c) e d) I20V55; e) e f) I70V55; g) e h) I20V40; i) e j) I70V40; k) e l) I0V40





Fonte: Autoria própria, 2019.

A zona fundida dos cordões soldados utilizando o twin arc com adição de arame frio apresentam como principais microconstituintes a ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita primária (PF), componentes típicos de um aço carbono e aços baixa liga. Assim como ocorreu nos cordões produzidos por tandem arc, a maior fração volumétrica é predominantemente de ferrita acicular, seguido de ferrita de contorno de grão.

Analisando as micrografias das zonas fundidas, o primeiro fato que podemos assinalar é o aumento do tamanho da ferrita de contorno de grão e das placas de ferrita acicular. Aumentar a entrada de calor reduziu as taxas de resfriamento responsáveis pelo o engrossamento dos grãos, conforme descritos por David et al. (2003); Thewlis (2004) e Krauss (2003). Os mecanismos descritos por estes autores para formação dos microconstituintes da zona fundida levam em consideração fatores como: estrutura primária de solidificação, tamanho de grão da austenita prévia, tipo de distribuição e tamanho de inclusões não metálicas, teor dos diferentes elementos de liga (baixa ou elevada diluição) e ciclos térmicos de soldagem, além dos parâmetros de soldagem utilizados. Tais fatores determinam o desenvolvimento destas microestruturas. Desta forma, avaliar a composição microestrutural de acordo com a influência gerada por um parâmetro de maneira individual se torna complexo (Borba *et al.*, 2015, 2017).

Entretanto, pode-se afirmar que há redução da fração volumétrica do microconstituente AF, também proporcionado pelo aumento do aporte térmico, o mesmo foi descrito por Barbosa et al. (2018) em seu trabalho que avaliou soldas produzidas em tandem-twin com adição de arame frio e elevado aporte térmico. Ao contrário do que acontece com a variação de aporte térmico, as alterações nas porcentagens de arame frio impostos no cordão de solda não alteraram de forma significativa a fração volumétrica dos microconstituintes da zona fundida.

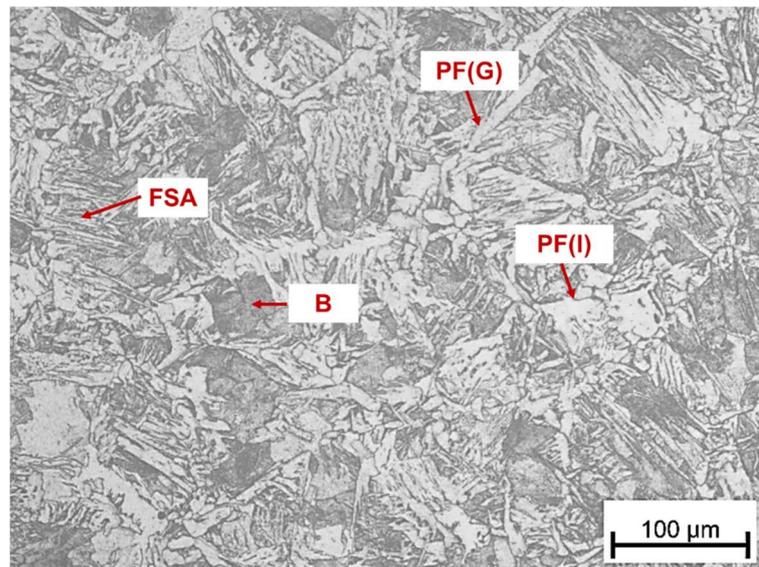
Mesmo com a redução do aporte térmico efetivo, assim denominado por Rigdal et al. (2002), pela adição do arame frio na poça de fusão, não houve mudanças microestruturais consideráveis na zona de fusão dos cordões analisados, sendo suas maiores implicações avaliadas na ZTA e nas propriedades mecânicas. A literatura apresenta número reduzido de trabalhos com análises microestruturais da zona fundida para juntas produzidas com adição de arame frio, em sua grande maioria atentam-se a região ZTA de crescimento de grão (ZTAGG), os quais serão discutidos na próxima secção (Barbosa, 2018; Castro, 2017; Mohammadjoo *et al.*, 2015, 2017a; Ramakrishnan; Muthupandi, 2013; Ramakrishnan; Padmanaban; Muthupandi, 2013; Xiang *et al.*, 2016).

Na Figura 34 apresenta a composição do zona de grãos grosseiros da ZTA dos cordões de solda produzidos pela variável do processo twin arc com adição de arame frio, onde os principais microconstituintes encontrados são: ferrita de contorno de grão

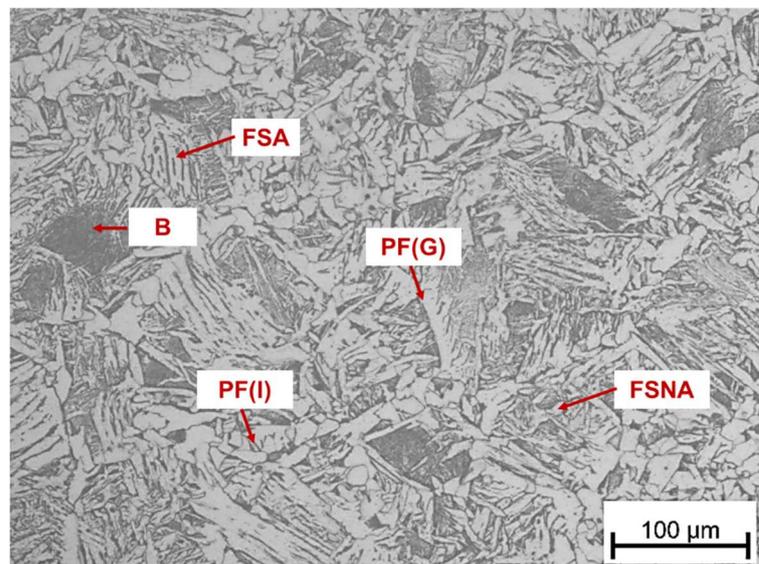
(FG); ferrita com segunda fase alinhada (FSA) e não alinhada (FSNA); ferrita de Widmanstätten ( $\alpha_W$ ) e bainita (B).

Como esperado, a ZTAGG para cordões soldados em twin arc apresentam o mesmo comportamento dos cordões produzidos com tandem arc, o aumento do aporte térmico proporcionou aumento dos grãos e engrossamento das microestruturas presentes. As diferenças com relação aos tamanhos dos microconstituintes é melhor percebida entre as Figura 34-a e 34-d, respectivamente menor e maior aporte térmicos.

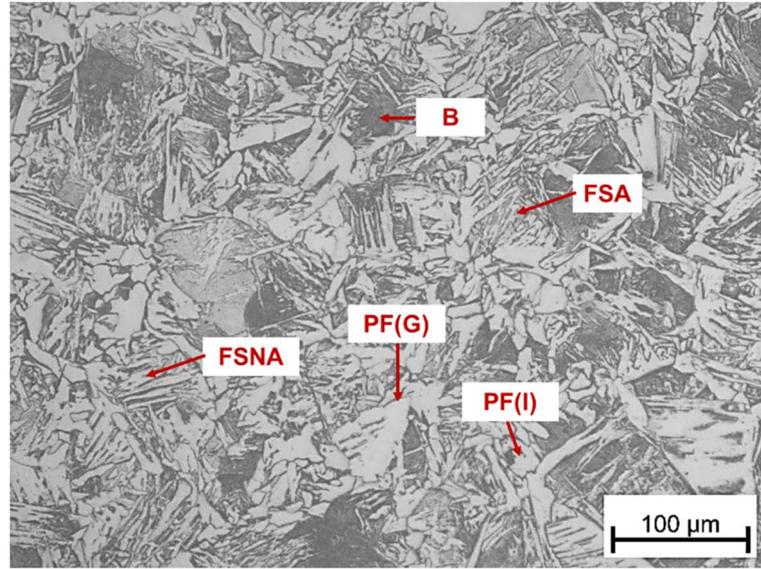
Figura 34 - Micrografias da ZTA Região de Grãos Grosseiros (a) I0V60; (b) I20V55; (c) I70V55; (d) I0V40; (e) I20V40 e (g) I70V40



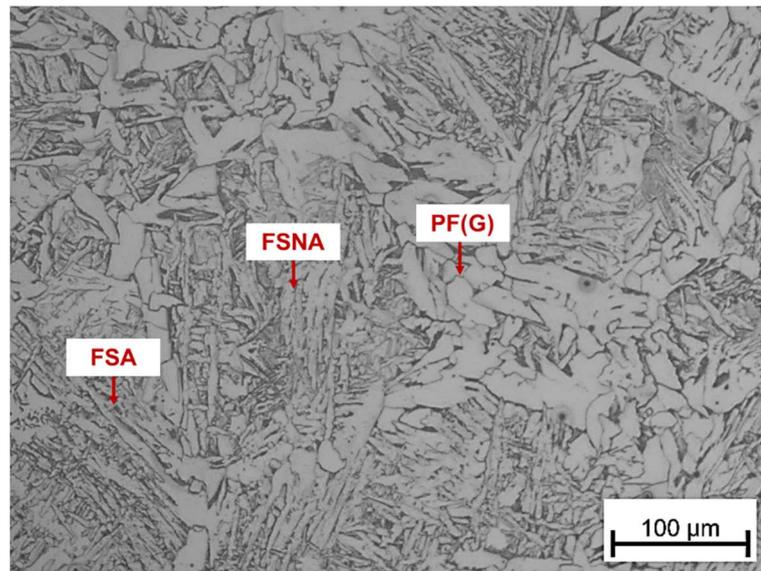
a) I0V60



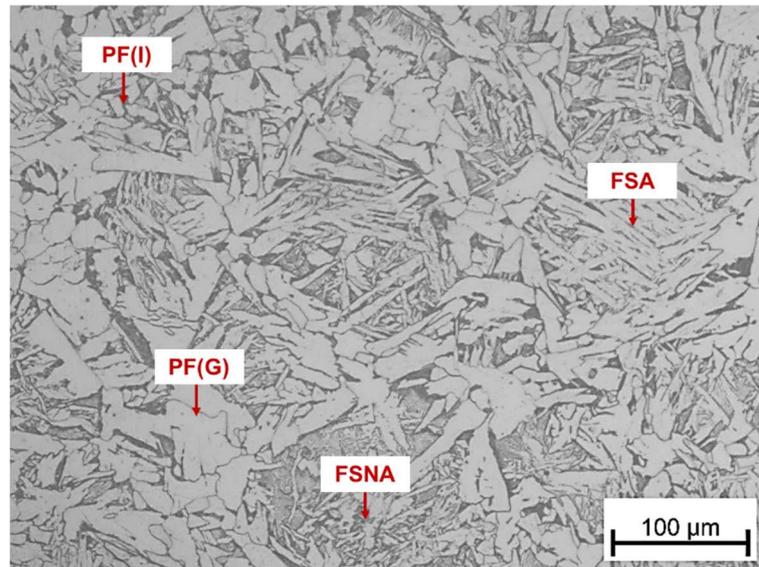
b) I20V55



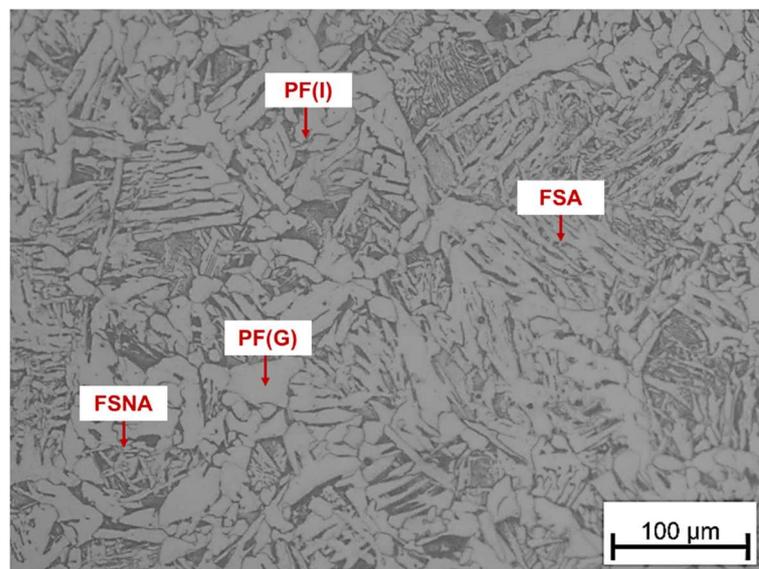
c) I70V55



d) I0V40



e) I20V40



f) I70V40

Fonte: Autoria própria, 2019.

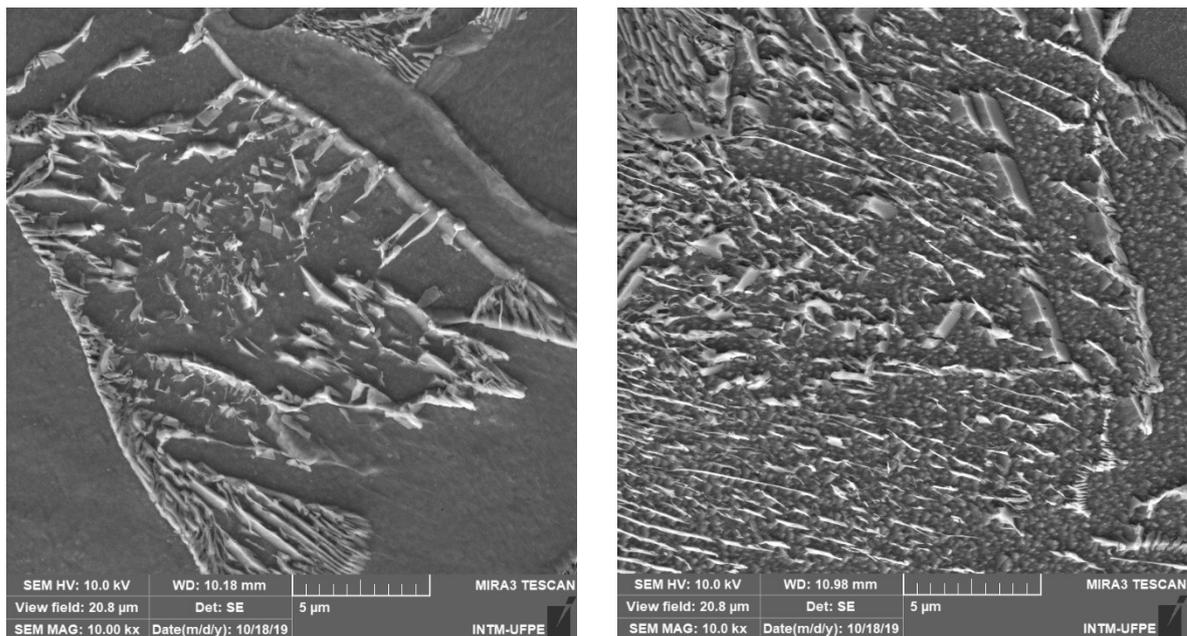
Barbosa (2018) utilizou aportes térmicos superiores aos utilizados neste trabalho, no entanto, a diferença das energias utilizadas causaram resultados semelhantes. Mohammadijoo et al. (2017a) reportou que o uso de arame frio no processo tandem arc causou redução no tamanho de grão, devido a redução do aporte térmico influenciado pela parcela de arame frio adicionado a poça de fusão, além de gerar influências positivas na resistência ao impacto quando comparado ao tandem arc convencional. Na análise realizada por Ramakrisnan et al. (2013), a adição de arame

frio forneceu melhoria nas propriedades mecânicas das amostras, aumento da taxa de deposição, redução da ZTA e refinamento dos grãos.

Entre as amostras com mesmo aporte térmico, a adição do arame frio reduz o aporte térmico efetivo, conforme descrito por Kesavan et al. (2016), e com o aporte térmico efetivo menor promove redução da largura da ZTA e refina os grãos por alterar as taxas de resfriamento. Segundo Rigdal (2002), o menor aporte térmico efetivo é causado na soldagem com arame frio pois parte da energia é usada para derreter o arame extra e, portanto, não está disponível para aquecer o região da ZTA, assim como consequência se tem uma ZTA mais estreita e mais refinada.

A Figura 35 apresenta a confirmação da presença de grãos mais finos, como a bainita.

Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura evidenciando a presença de bainita na ZTA (a) I20V55 (b) I20V40



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Apesar de apresentar refinamento de grãos e redução da ZTA, uma análise mais detalhada sobre a influência do arame frio só poderá ser discutida após resultados de ensaios mecânicos nos cordões estudados. Somente a caracterização microestrutural não é capaz de determinar se houve ou não melhoria significativa das propriedades propostas por diversos autores (Barbosa et al., 2018; Cardoso Junior et al., 2018;

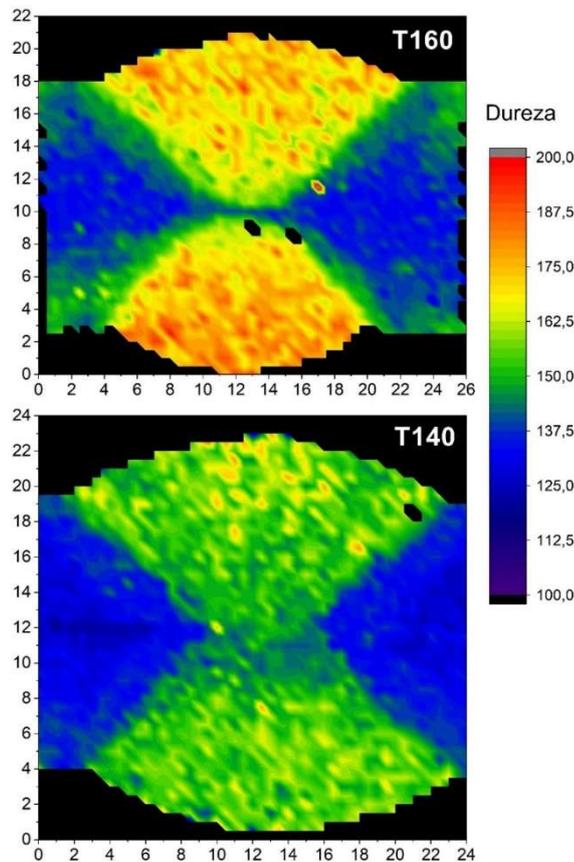
Castro, 2017; Mohammadijoo *et al.*, 2015, 2017a; Ramakrishnan; Muthupandi, 2013, 2013) com a utilização do arame frio e uso de menor aporte térmico efetivo.

### 5.8 Distribuição de Dureza

A apresenta os mapas de dureza dos cordões produzidos por tandem arc. Utilizou-se as amostras T160 e T120, menor e maior aporte térmico respectivamente. A aumento do aporte térmico reduz a dureza, esse comportamento é sugerido pelos componentes microestruturais presentes e resultantes de ciclos térmicos impostos pela variação de aporte térmico no cordão (Barbosa *et al.*, 2018; Borba *et al.*, 2017; Sharma; Chhibber, 2018).

A amostra T160 apresenta valores de dureza entre 170 – 200 HV no cordão de solda. Na ZTA os valores estão entre 150 – 170 HV. Enquanto isso, a amostra T120 com maior aporte térmico, os valores de dureza da ZF apresentam-se menores, entre 150 – 170 HV. A ZTA para esta mesma amostra também ocupou essa faixa de valores.

Figura 36 - Mapa de dureza dos cordões soldados em tandem arc: T160 e T120

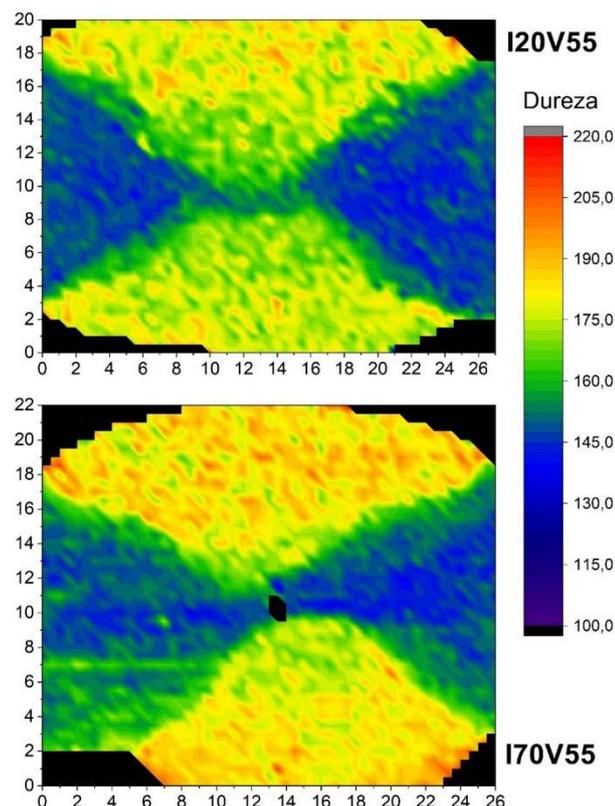


Fonte: Autoria própria, 2019.

O cordão da amostra T160 apresenta valores de dureza no cordão de solda superiores ao metal de base, indicando que o metal de solda é overmatched. Enquanto o cordão T120, com valores dureza do cordão de solda próximos ao do metal de base, é matched. Os valores de dureza apresentados para a amostra T160 se dá principalmente pela presença da ferrita acicular, que confere maior dureza ao metal de solda. Enquanto na amostra T120, a dureza é reduzida devido ao engrossamento dos grãos presentes neste cordão de solda (Borba *et al.*, 2017; Farhat, Hanan, 2007; Kiran *et al.*, 2015).

A Figura 37 apresenta os mapas de dureza das amostras soldadas em twin arc com diferença no aporte térmico efetivo, uma vez que apenas o percentual de arame frio foi modificado.

Figura 37 - Mapa de dureza dos cordões soldados em twin arc: I20V55 e I70V55



Fonte: Autoria própria, 2019.

O primeiro mapa representa a amostra com 20% de arame frio e velocidade de 55 cm/min, enquanto a segunda representa a amostra com 70% de arame frio e mesma velocidade de soldagem, 55 cm/min.

A redução do aporte térmico efetivo causado pelo incremento da porcentagem de arame frio de 20% para 70% nas amostras apresentadas permitiu o aumento de dureza na zona fundida. Esse comportamento pode ser explicado pelas transformações microestruturais ocorridas, o que inclui aumento percentual da fração volumétrica de ferrita acicular e menor quantidade de ferrita de contorno de grãos para estas amostras. Na região da ZTA, a amostra I70V55 apresenta maiores valores de dureza quando comparado com a amostra I20V55, isto também pode ser explicado pelo tempo de exposição a altas temperaturas ser menor e como consequência refinar os grãos (Borba *et al.*, 2017; Lan *et al.*, 2012; Prasad; Dwivedi, 2008).

Este comportamento de aumento de dureza com redução do aporte térmico causado pelo uso do arame frio também foi reportado por Mohammadijoo *et al.* (2017a), em seu trabalho sobre o efeito do uso de arame frio na produtividade em soldas produzidas por tandem arc. Ramakrishnan (2013) descreve o aumento da dureza pelo refinamento de grão e indica a ferrita acicular como principal responsável pelo aumento dessa propriedade na zona fundida.

Finalmente, o aumento da porcentagem de arame frio na participação da poça de fusão pode ter influenciado o aumento da dureza no metal de solda pela presença de molibidênio no arame. Para Sirin *et al.* (2016) e Bhole *et al.* (2006), adições de Mo de até 0,4% em peso podem ser usadas para aumentar a porcentagem de ferrita acicular, que promove aumento de dureza, assim como observadas nas amostras apresentadas.

## 6 CONCLUSÕES

Após análises preliminares, este estudo permitiu concluir que:

- Foi possível determinar a faixa de parâmetros para soldagem com arco submerso em twin arc com a adição de arame frio em chapas de 16 mm e chanfro reto com dois passes de solda. Onde com os parâmetros utilizados fica restrito a faixa de 40 a 55 cm/min com limites de arame frio em 70%.
- Para os cordões produzidos em tandem arc, a variação de velocidade não causou grandes alterações no coeficiente de diluição.
- Os parâmetros geométricos como altura de reforço, penetração e largura do cordão aumentam com o incremento do aporte térmico produzidos em tandem arc.
- Para os cordões produzidos com twin arc e adição de arame frio, o aporte térmico parece ser mais significativo que as variações da taxa de arame frio utilizados.
- As áreas de reforço são mais influenciadas do que as áreas de penetração quando variado a taxa de arame frio.
- O aporte térmico causa maiores variações na geometria do cordão de solda do que a taxa de arame frio.
- Os microconstituintes da zona fundida dos cordões em tandem arc são: ferrita acicular, ferrita de segunda fase e ferrita de contorno de grão, com maior concentração para o primeiro. O engrossamento das ripas de ferrita acicular é proporcionado pelo aumento aporte térmico.
- Os microconstituintes da zona fundida dos cordões em twin arc com arame frio são: ferrita acicular e ferrita de contorno de grão, com maior fração volumétrica para a ferrita acicular. A microestrutura da ZF dos cordões em twin arc é mais refinada dos produzidos em tandem. Não há grande número de pesquisas sobre a ZF para twin e tandem.
- A ZTA dos cordões tandem arc apresentaram como principais microconstituintes a ferrita de segunda fase alinhada, ferrita de Widmanstätten,

ferrita de contorno de grão e bainita. Com o aumento do aporte térmico houve o engrossamento dos grãos.

- A ZTA dos cordões em twin arc não possui subdivisões perceptíveis como a ZTA dos cordões em tandem arc. Como principais microconstituintes: ferrita de segunda fase: alinhada e não alinhada, ferrita de contorno de grão e em menores aportes a presença de bainita. Nas amostras com menor aporte térmico, a adição de arame frio promoveu o refino de grãos.
- E por fim, com relação a dureza, houve a redução de valores com aumento do aporte térmico, devido ao engrossamento dos grãos. Esse comportamento foi observado para o tandem arc quando para o twin arc. Além disso, a adição do arame frio em cordões produzidos com mesmos parâmetros provocou o aumento da dureza.

## 7 REFERÊNCIAS

American Society of Mechanical Engineers. **ASME section IX: qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators**. IX ed. New York: ASME; 2017.

ASLANI, Farhad *et al.* Behaviour and design of hollow and concrete-filled spiral welded steel tube columns subjected to axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], v. 128, p. 261–288, 2017.

BARBOSA, Luiz Henrique Soares *et al.* Microestrutura e Características Mecânicas da Zona Fundida de um Aço Naval Soldado ao Arco Submerso com Aporte Térmico Muito Elevado. **Soldagem & Inspeção**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 168–179, 2018.

BARBOSA, Luiz Henrique Soares. **Propagação de Trincas por Fadiga na Zona Fundida de Soldas Obtidas em Único Passe com Altíssima Energia de Soldagem Através do Processo SAW com Adição de Arame Frio em um Aço EH36**. 2018. 162 f. Tese de Doutorado (Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2018.

BARROS JR, JOSÉ FRANCISCO DE CAMARGO. **AUMENTO DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM PARA PROCESSO DE ARCO SUBMERSO EM JUNTAS DE UM TUBO DE AÇO API X70**. 2009. 131 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, [s. l.], 2009.

BABU, S. S.; DAVID, S. A. Inclusion Formation and Microstructure Evolution in Low Alloy Steel Welds. **ISIJ International**, v. 42, n. 12, p. 1344–1353, 2002.

BABU, S. S. The mechanism of acicular ferrite in weld deposits. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 8, n. 3–4, p. 267–278, jun. 2004.

BEIDOKHTI, B.; KOKABI, A. H.; DOLATI, A. A comprehensive study on the microstructure of high strength low alloy pipeline welds. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 597, p. 142–147, jun. 2014.

BHOLE, S.D. *et al.* Effect of nickel and molybdenum additions on weld metal toughness in a submerged arc welded HSLA line-pipe steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 173, n. 1, p. 92–100, 2006.

BORBA, Tadeu Messias Donizete *et al.* Avaliação da Soldabilidade do Aço Naval EH36 TMCP Soldado por Arco Submerso com Elevado Aporte de Calor. **Soldagem & Inspeção**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 92–104, 2015.

BORBA, Tadeu Messias Donizete *et al.* Avaliação da Soldabilidade do Aço Sincron EN 10025-4 S355M Aplicado na Fabricação de Torres Eólicas com Processo de

Soldagem de Alta Deposição. **Soldagem & Inspeção**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 413–428, 2017.

CARDOSO JUNIOR, Ronaldo *et al.* Avaliação da Energia de Soldagem e da Adição de Arame Frio nas Características Dimensionais, Químicas e Metalúrgicas do Metal de Solda Obtido por Arco Submerso em Aços Inoxidáveis Lean Duplex UNS S32304. **Soldagem & Inspeção**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 264–276, 2018.

CARDOSO JUNIOR, Ronaldo. **Avaliação da influência da energia de soldagem e da adição de arame frio em soldas SAW com arames geminados em aços inoxidáveis lean duplex UNS S32304**. 2018. 212 f. Tese de Doutorado (Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2018.

CASTRO, Moara Marques de. **Estudo da influência da adição de arame frio no processo de soldagem ao arco submerso com dois arames energizados: Aspectos operacionais e metalúrgicos**. 2017. 93 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2017.

DAVID, S. A.; BABU, S. S.; VITEK, J. M. Welding: Solidification and microstructure. **JOM**, [s. l.], v. 55, n. 6, p. 14–20, 2003.

DHAS, J. Edwin Raja; KUMANAN, S. Optimization of parameters of submerged arc weld using non conventional techniques. **Applied Soft Computing**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 5198–5204, 2011.

FARHAT, H. **Effects of Multiple Wires and Welding Speed on the Microstructures and Properties of Submerged Arc Welded X80 Steel**. Saskatoon: [s. n.], 2007. p. 159

FARHAT, Hanan. **Effects of Multiple Wires and Welding Speed on the Microstructures and Properties of Submerged Arc Welded X80 Steel**. 2007. 159 f. Doctorate Thesis (Mechanical Engineering) - University of Saskatchewan, Saskatoon, 2007.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, Welerson. **Apostila de Arco Submerso**. [S. l.]: ESAB, 2018.

GUNARAJ, V; MURUGAN, N. Prediction of heat-affected zone characteristics in submerged arc welding of structural steel pipes. **WELDING JOURNAL-NEW YORK**, [s. l.], v. 81, n. 3, p. 45-s, 2002.

GUNARAJ, V; MURUGAN, N. Prediction of Heat-Affected Zone Characteristics in Submerged Arc Welding of Structural Steel Pipes. **WELDING RESEARCH**, [s. l.], v. 81, p. 94–98, 2002.

KESAVAN, R. D. *et al.* Influence of heat input variation using cold wire on performance of inverted type submerged arc welding process – IS 2062 carbon steel. **International Journal of Advanced Multidisciplinary Research**, [s. l.], v. 3, n. 6, p. 39–50, 2016.

KIRAN, Degala Venkata *et al.* A study on the quality of two-wire tandem submerged arc welds under iso-heat input conditions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 78, n. 1–4, p. 53–62, 2015.

KIRAN, D.V. *et al.* Arc behavior in two wire tandem submerged arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 214, n. 8, p. 1546–1556, 2014.

KIRAN, D. V. *et al.* Probing influence of welding current on weld quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 111–116, 2010.

KIRAN, D.V.; BASU, B.; DE, A. Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 212, n. 10, p. 2041–2050, 2012.

KIRAN, Degala Ventaka; NA, Suck-Joo. Experimental Studies on Submerged Arc Welding Process. **Journal of Welding and Joining**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 1–10, 2014.

KOLHE, Kishor P.; DATTA, C.K. Prediction of microstructure and mechanical properties of multipass SAW. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 197, n. 1–3, p. 241–249, 2008.

KRAUSS, George. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels. **Metallurgical and Materials Transactions B**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 781–792, 2003.

KRAUSS, G; THOMPSON, S. W. Ferritic Microstructures in Continuously Cooled Low and Ultralow Carbon Steels. **ISIJ International**, Vol. 35, No. 8, pp. 937-945, 1995.

LAFDANI, MH Kakaei; GHADIRI ZHRANI, Esmaeil; GALLOWAY, Alexander M. Optimization study of weld geometry in the tandem submerged arc welding process. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 229, n. 6, p. 1068–1077, 2015.

LAN, L Y *et al.* Effect of single pass welding heat input on microstructure and hardness of submerged arc welded high strength low carbon bainitic steel. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 564–570, 2012.

LAYUS, P. *et al.* Multi-wire SAW of 640 MPa Arctic shipbuilding steel plates. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 75, n. 5–8, p. 771–782, 2014.

LI, Peilin; LU, Hao. Hybrid heat source model designing and parameter prediction on tandem submerged arc welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 62, n. 5–8, p. 577–585, 2012.

LIPPOLD, John C. **Welding metallurgy and weldability**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2015.

LU, Yi *et al.* Predictive control based double-electrode submerged arc welding for fillet joints. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 415–426, 2014.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte - MG: Editora UFMG, 2014.

MOHAMMADIJOO, M *et al.* COLD-WIRE TANDEM SUBMERGED ARC WELDING: A NOVEL TECHNIQUE FOR PIPELINE MANUFACTURING. *In:* , 2015, Canada. **AMCAA | America's Conference on Aluminum Alloys**. Canada: [s. n.], 2015. p. 1–13.

MOHAMMADIJOO, Mohsen *et al.* Evaluation of cold wire addition effect on heat input and productivity of tandem submerged arc welding for low-carbon microalloyed steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 92, n. 1–4, p. 817–829, 2017a.

MOHAMMADIJOO, Mohsen *et al.* Influence of cold-wire tandem submerged arc welding parameters on weld geometry and microhardness of microalloyed pipeline steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 88, n. 5–8, p. 2249–2263, 2017b.

MOON, J.; KIM, S.-J.; LEE, C. **Effect of thermo-mechanical cycling on the microstructure and strength of lath martensite in the weld CGHAZ of HSLA steel**. *Materials Science and Engineering: A*, v. 528, n. 25–26, p. 7658–7662, set. 2011.

NARANG, Harendra K *et al.* Modelling and predicting the effects of submerged arc weldment process parameters on weldment characteristics and shape profiles. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 226, n. 7, p. 1230–1240, 2012.

PEPIN, Joel Todd. **Effects of Submerged Arc Weld (SAW) Parameters on Bead Geometry and Notch-Toughness for X70 and X80 Linepipe Steels**. 2009. 232 f. Doctorate Thesis (Mechanical Engineering) - University of Alberta, Edmonton, Alberta, 2009.

PRASAD, Keshav; DWIVEDI, D. K. Some investigations on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 36, n. 5–6, p. 475–483, 2008.

RAMAKRISHNAN, M.; MUTHUPANDI, V. Application of submerged arc welding technology with cold wire addition for drum shell long seam butt welds of pressure vessel components. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 65, n. 5–8, p. 945–956, 2013.

RAMAKRISHNAN, M.; PADMANABAN, K.; MUTHUPANDI, V. Studies on fracture toughness of cold wire addition in narrow groove submerged arc welding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 68, n. 1–4, p. 293–316, 2013.

RIBEIRO, ANDERSON CLAYTON NASCIMENTO. **AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM DO AÇO NAVAL AH36 MICROLIGADO SOLDADO PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO COM UM E DOIS ARAMES**. 2015. 170 f. Dissertação de Mestrado

(Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2015.

RIGDAL, Solveig; KARLSSON, Leif; ÖSTGREN, Lars. Synergic Cold Wire (SCW™) Submerged Arc Welding: Application of a new cost efficient welding technique to stainless steels. *In:* , 2002, Sweden. **Anais [...]**. Sweden: [s. n.], 2002. p. 26–31.

SADOWSKI, Adam J.; ROTTER, J. Michael. Modelling and behaviour of cylindrical shell structures with helical features. **Computers & Structures**, [s. l.], v. 133, p. 90–102, 2014.

SANTOS, T. F. A. et al. Caracterização microestrutural de aços baixo carbono por microscopia de força atômica. **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales**. [online]. 2015, vol.35, n.1, pp. 118-133

SHARMA, Abhay. A fundamental study on qualitatively viable sustainable welding process maps. **Journal of Manufacturing Systems**, [s. l.], v. 46, p. 221–230, 2018.

SHARMA, Abhay *et al.* Estimation of heat source model parameters for twin-wire submerged arc welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 45, n. 11–12, p. 1096–1103, 2009.

SHARMA, Abhay; ARORA, Navneet; MISHRA, Bhanu K. A practical approach towards mathematical modeling of deposition rate during twin-wire submerged arc welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 36, n. 5–6, p. 463–474, 2008.

SHARMA, Lochan; CHHIBBER, Rahul. Mechanical properties and hydrogen induced cracking behaviour of API X70 SAW weldments. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [s. l.], v. 165, p. 193–207, 2018.

SHARMA, Satish Kumar; MAHESHWARI, Sachin; SINGH, Ratnesh Kumar Raj. Effect of heat-input and cooling-time on bead characteristics in SAW. **Materials and Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 208–215, 2019.

SHEN, S.; OGUOCHA, I.N.A.; YANNACOPOULOS, S. Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 212, n. 1, p. 286–294, 2012.

SILVA, Marcos Mesquita da *et al.* Otimização de Parâmetros do Processo de Soldagem Arco Submerso para Revestimentos Anticorrosivos. **Soldagem & Inspeção**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 115–124, 2016.

SILVA, Ana Carla Santos da *et al.* Soldagem Helicoidal de Tubos Produzida em Campo do Aço ASTM A-1018 e sua Correlação com Características Mecânicas e Microestruturais das Juntas Soldadas. **Soldagem & Inspeção**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 364–379, 2018.

SINGH, Ravinder Pal; SHUKLA, Dinesh Kumar. Mathematical modeling of effect of polarity on weld bead geometry in submerged arc welding. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 21, p. 14–22, 2016.

SIRIN, Kahraman; SIRIN, Sule Y.; KALUC, Erdinc. Influence of the chemical composition of weld electrode on the mechanical properties of submerged arc welded pipe. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 87, n. 5–8, p. 1941–1950, 2016.

THEWLIS, G. Classification and quantification of microstructures in steels. **Materials Science and Technology**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 143–160, 2004.

TUŠEK, Janez. Mathematical modeling of melting rate in twin-wire welding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 100, n. 1–3, p. 250–256, 2000.

TUŠEK, J.; SUBAN, M. High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 133, n. 1–2, p. 207–213, 2003.

TUŠEK, J.; UMEK, I.; BAJCER, B. Weld-cost saving accomplished by replacing single-wire submerged arc welding with triple-wire welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 15–22, 2005.

XIANG, T. *et al.* Effects of filling status of cold wire on the welding process stability in twin-arc integrated cold wire hybrid welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 83, n. 9–12, p. 1583–1593, 2016.

YANG, Xiuzhi *et al.* Twin-wire submerged arc welding process of a high-strength low-alloy