

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM PROJETO E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE METAL DE ADIÇÃO E GÁS  
DE PROTEÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO  
GALVANIZADO

Ricardo Augusto Fensterseifer

Passo Fundo

2024



CIP – Catalogação na Publicação

---

F341a Fensterseifer, Ricardo Augusto  
Análise da influência de metal de adição e gás de  
proteção em juntas soldadas de aço galvanizado [recurso  
eletrônico] / Ricardo Augusto Fensterseifer. – 2024.  
4.9 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. William Haupt.  
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de  
Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2024.

1. Processos de fabricação. 2. Aço galvanizado.  
3. Soldas e soldagens. I. Haupt, William, orientador.  
II. Título.

CDU: 621.791

---

Catálogo: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Ricardo Augusto Fensterseifer

## **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE METAL DE ADIÇÃO E GÁS DE PROTEÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO GALVANIZADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 06 de maio de 2024.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor William Haupt  
Orientador

Professora Doutora Aline Dettmer  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Charles Leonardo Israel  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Alexandre Aparecido Buenos  
Universidade Federal de Santa Maria

## **AGRADECIMENTOS**

Á Deus, na Sua onipresença me fortalece.

Aos meus pais (Rose e Oscar) e namorada (Bárbara), portos seguros em todos os momentos desta caminhada.

Á Comil Ônibus, ao diretor Jaime Schneider e Ben Hur Abrahão Filho, por acreditarem na importância do estudo, pela troca de conhecimento e ajuda no desenvolvimento experimental.

Ao professor William Haupt pela orientação e conhecimento nesta jornada e ao ITEC UPF pela disponibilidade para uso da infraestrutura laboratorial fundamental para a pesquisa.

*Entre o estímulo e a resposta existe um espaço.  
Nesse espaço está nosso poder de escolher  
nossa resposta. Em nossa resposta está nosso  
crescimento e nossa liberdade.*

Viktor Frankl

## RESUMO

A ampla adoção de aço galvanizado no segmento industrial, como a indústria automotiva, baseia-se em ótimas propriedades em conferir durabilidade aos produtos manufaturados, além de reduzir impactos ambientais e custos na cadeia produtiva, evitando-se corrosão e conferindo maior vida útil devido a camada protetora de zinco. Porém, essa camada quando submetida a processo de soldagem implica potenciais defeitos devido a evaporação de zinco e fragilidade do metal líquido durante a soldagem, com potencial geração de porosidade, falta de penetração ou fusão. Esses defeitos podem trazer impactos significativos na redução de propriedades mecânicas, trincas e fraturas nas juntas soldadas. Neste trabalho, essas implicações são analisadas através das características microestruturais e propriedades mecânicas de juntas soldadas com aço galvanizado ZAR230 pelos processos de soldagem GMAW e FCAW, avaliando-se fatores mais amplamente modificados em escala industrial nessa técnica de soldagem: o tipo de metal de adição, sendo ele arame sólido ou tubulares – autoprotégido com proteção gasosa e sem proteção gasosa, e o tipo de gás de proteção (com misturas de 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> e 95% Ar + 5% O<sub>2</sub>). Utilizando-se de técnicas de microscopia ótica de varredura, metalografia, ensaios de tração, microdureza e raios-X, os resultados apontam que todas as condições testadas possuem propriedades mecânicas de dureza e tração acima dos limites do metal base, com variação de presença de defeitos, inclusões e aspecto de cordão, sendo a melhor combinação a de uso do arame sólido com mistura 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> porque apresenta menor presença de defeitos e melhores propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Aço galvanizado; Arame tubular; Gás de proteção.

## ABSTRACT

The wide adoption of galvanized steel in the industrial segment, such as the automotive industry, is based on excellent properties in providing durability and weight reduction to manufactured products, in addition to reducing environmental impacts and costs in the production chain, avoiding corrosion, and providing longer lifecycle useful due to the protective zinc layer. However, this layer when submitted to the welding process implies potential defects due to evaporation of zinc and fragility of the liquid metal during welding, with potential generation of porosity, lack of penetration or melting. These defects can significantly impact the reduction of mechanical properties, cracks and fractures in welded joints. In this work these implications are analyzed through the microstructural characteristics of joints welded with ZAR230 galvanized steel by the GMAW and FCAW welding processes, evaluating the mostly common factors that are modified on an industrial scale in this welding technique: the type of filler metal, whether solid wire or tubular – self-protected with gas protection and without gas protection, and the type of protection gas (with mixtures of 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> and 95% Ar + 5% O<sub>2</sub>). Using techniques such as scanning optical microscopy, metallography, strength tests, microhardness and X-rays, the results indicate that all tested conditions have mechanical properties of hardness and traction above the limits of the base metal, with variation in the presence of defects, inclusions and bead appearance, with the best combination being the use of solid wire with a mixture of 92% Air + 8% CO<sub>2</sub> because it presents fewer defects and better mechanical properties.

Keywords: Galvanized steel; Metal cored wire; Shielding gas.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Barreira formada por revestimento de zinco	14
Figura 2 – Etapas da galvanização por imersão a quente	16
Figura 3 – Revestimento de zinco típico em aços galvanizados	17
Figura 4 - Processo de solda GMAW	20
Figura 5 – Fatores que interferem no processo de soldagem e suas relações com a energia nominal da soldagem	23
Figura 6 – Condutividade elétrica e térmica de gases	26
Figura 7 – Perfis característicos de cordões de solda com diferentes gases de proteção	26
Figura 8 – Bobina e forma de seção transversal de arames tubulares	29
Figura 9 – Diferença entre arame tubular autoprottegido e com proteção gasosa	30
Figura 10 – Ilustração de diferentes tipos de defeitos de solda	33
Figura 11 – Porosidade em junta soldada em união de chapas	35
Figura 12 – Exemplo de micrografia (a) e macrografia (b) em aço galvanizado	38
Figura 13 – Exemplo de radiografia em aço galvanizado	39
Figura 14 – Fluxograma da execução dos experimentos	42
Figura 15 – Corpo de prova posicionado na estrutura do gabarito	44
Figura 16 – Seccionamento de amostras para cada ensaio em um corpo de prova	45
Figura 17 – Macroestruturas das juntas soldadas para cada condição avaliada	48
Figura 18 – Micrografia do metal base (aço galvanizado ZAR230) – ampliação 100x	49
Figura 19 – Micrografia do metal base (aço galvanizado ZAR230) – ampliação 200x	50
Figura 20 – Micrografia da junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 92%Ar/8%CO <sub>2</sub> - amostra 01	51
Figura 21 – Micrografia da junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 80%Ar/20%CO <sub>2</sub> amostra 04	52
Figura 22 – Micrografia da junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 95%Ar/5%O <sub>2</sub> - amostra 07	53
Figura 23 – Micrografia da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 92%Ar/8%CO <sub>2</sub> - amostra 10	54
Figura 24 – Micrografia da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 80%Ar/20%CO <sub>2</sub> - amostra 13	55
Figura 25 – Micrografia da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 95%Ar/5%O <sub>2</sub> amostra 16	56

Figura 26 – Micrografia da junta soldada na condição de arame tubular sem proteção gasosa autoprotégido FCAW-S (E71T-1M) - amostra 19	57
Figura 27 – Porosidade na região de metal adição fundido com arame tubular com proteção gasosa e mistura 92% Ar/8% CO <sub>2</sub> - amostra 10	58
Figura 28 – Porosidade na região de metal adição fundido com arame autoprotégido - amostra 19	58
Figura 29 – Microscopia ótica de varredura para junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 92% Ar/8% CO <sub>2</sub> - amostra 01	59
Figura 30 - Microscopia ótica de varredura para junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 80% Ar/20% CO <sub>2</sub> - amostra 04	60
Figura 31 - Microscopia ótica de varredura para junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 95% Ar/5% O <sub>2</sub> - amostra 07	61
Figura 32 - Microscopia ótica de varredura da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 92% Ar/8% CO <sub>2</sub> - amostra 10	62
Figura 33 - Microscopia ótica de varredura da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 80% Ar/20% CO <sub>2</sub> - amostra 13	63
Figura 34– Microscopia ótica de varredura da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 95% Ar/5% O <sub>2</sub> - amostra 16	64
Figura 35 – Microscopia ótica de varredura da junta soldada na condição de arame tubular sem proteção gasosa autoprotégido FCAW-S (E71T-1M) - amostra 19	65
Figura 36 – Ensaio de raio-x	66
Figura 37 – Ensaio de tração	67
Figura 38 – Gráfico de médias para tensão de escoamento com intervalo de confiança de 95%	69
Figura 39 – Médias para tensão máxima (MPa) com intervalo de confiança de 95%	70
Figura 40 – Média de alongamento (%) em cada amostra o num intervalo de confiança de 95%	71
Figura 41 – Gráfico de médias de dureza (HV) na região de metal de adição para cada amostra avaliada num intervalo de confiança de 95%	73
Figura 42 – Gráfico de médias de dureza (HV) na região de zona afetada pelo calor para cada amostra avaliada num intervalo de confiança de 95%	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento Experimental	40
Tabela 2 – Parâmetros de solda do procedimento experimental	41
Tabela 3 – Composição Química e Propriedades Mecânicas do aço ZAR230	43
Tabela 4 – Composição química dos metais de adição	43
Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos metais de adição	43
Tabela 6 - Percentuais de porosidade do metal de adição obtidos com microscopia ótica de varredura	65
Tabela 7 – Dados do ensaio de tração	67
Tabela 8 – Análise Tensão Escoamento (MPa)	68
Tabela 9 – Análise Tensão Máxima (MPa)	69
Tabela 10 – Análise Alongamento (%)	70
Tabela 11 – Perfil de microdureza (HV) em regiões de cada amostra avaliada com pós-hoc Tukey	72
Tabela 12 – Análise dureza na região de metal de adição entre as condições estudadas	73
Tabela 13 – Análise dureza na região da zona afetada pelo calor entre as condições estudadas	74

## LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
DBPC	Distância entre bico de contato e peça
EPS	Especificação do Processo de Soldagem
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva

## LISTA DE SÍMBOLOS

E	Energia nominal de soldagem, J/mm
$\eta$	Eficiência de transferência
U	Tensão elétrica, V
I	Corrente elétrica, A
$v$	Velocidade de soldagem, mm/s

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Aços galvanizados</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Soldagem GMAW</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Parâmetros de soldagem</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Gás de proteção</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Arame tubular</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4</b>	<b>Defeitos na soldagem de aço galvanizado</b> .....	<b>32</b>
<b>2.5</b>	<b>Técnicas de avaliação microestrutural de soldagem</b> .....	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>Planejamento experimental</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2</b>	<b>Especificações dos materiais</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3</b>	<b>Preparação dos corpos de prova</b> .....	<b>44</b>
<b>3.4</b>	<b>Técnicas de caracterização</b> .....	<b>45</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Microscopia ótica e varredura</b> .....	<b>45</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Ensaio de microdureza</b> .....	<b>46</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Raio x</b> .....	<b>46</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Ensaio de tração</b> .....	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Macrografia</b> .....	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>Micrografia</b> .....	<b>49</b>
<b>4.3</b>	<b>Microscopia de varredura (MEV)</b> .....	<b>59</b>
<b>4.4</b>	<b>Raio-x</b> .....	<b>66</b>
<b>4.5</b>	<b>Ensaio de tração</b> .....	<b>66</b>
<b>4.6</b>	<b>Análise de microdureza</b> .....	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>79</b>
	<b>ANEXO A – EPS</b> .....	<b>86</b>
	<b>ANEXO B – FICHAS TÉCNICA DOS ARAMES TUBULARES</b> .....	<b>87</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), é ampla e mundialmente utilizado nos setores industriais, podendo ser aplicado em materiais ferrosos e não ferrosos, o que se deve à sua versatilidade, produtividade relativamente alta, simplicidade e confiabilidade (THOMPSON MARTÍNEZ *et al.*, 2021). Especialmente nos últimos anos, essa tecnologia tem sido empregada na fabricação de peças de alto desempenho na indústria aeroespacial, no setor de energia, na área da arquitetura e na engenharia automobilística (HENCKELL *et al.*, 2020).

Todavia, mesmo com sua ampla utilização, o processo GMAW apresenta algumas dificuldades no processo, devido ao número relativamente alto de parâmetros que precisam ser devidamente monitorados. Fenômenos e processos físicos complexos estão envolvidos, em razão do aquecimento/fusão e resfriamento/solidificação. Assim, a combinação de todos os parâmetros e variáveis envolvidas para garantir solda de boa propriedade mecânica é grande, levando em consideração o tipo e a vazão dos gases de proteção; a distância entre as juntas a serem soldadas e o bocal da tocha de soldagem; a corrente e a tensão elétrica; a velocidade de soldagem empregada; a composição química e tipo de metal de adição; a composição química e o tipo do(s) metal(is) base; e a trajetória de soldagem. A variabilidade de processo desses parâmetros traz intrinsecamente o aparecimento de descontinuidades em solda (THOMPSON MARTÍNEZ *et al.*, 2021; TESFAYE, 2023).

Para sanar esses problemas, tem crescido a adoção de arames tubulares, isto é, constituídos de fluxo apropriado em seu interior para proteção do arco e do cordão, em substituição ao arame sólido (soldagem GMAW), caracterizando assim o processo chamado FCAW. Estudos como os de Das *et al.* (2021) apontam que o uso de arame tubular no lugar de arame sólido diminui a taxa de respingos e aumenta a deposição de metal. Porém, no FCAW, a inclusão de escória na poça de fusão é maior devido às impurezas provenientes tanto do fluxo, quanto do gás de proteção. Devido às inclusões mais altas, sua resistência à tração e alongamento são menores em comparação com o arame sólido além de que em juntas soldadas com arames tubulares há aumento da penetração.

A associação de metais de adição, como são os arames tubulares, com variações de gás de proteção podem trazer combinações de propriedades melhores para regiões soldadas, tal qual Sales (2002) indica na mudança de CO<sub>2</sub> puro como gás de proteção para uma mistura de CO<sub>2</sub> + Ar, modificando sensivelmente o modo de transferência metálica na soldagem do arame tubular; melhorando a eficiência de deposição na soldagem em corrente pulsada, mas afetando sensivelmente as características geométricas do cordão de solda.

Esses defeitos são potencializados quando o material base é o aço galvanizado, devido à camada superficial protetiva de zinco. No entanto, a utilização de aços galvanizados é ampla na indústria automobilística, pois confere proteção contra corrosão e ganhos de eficiência energética dos veículos devido a permitir redução de peso. Daltro (2000) apontou prevalência de melhor qualidade de solda para chapas finas de aço galvanizado com arames com baixo teor de desoxidantes. Dado esse contexto, defeitos como a porosidade, falta de fusão, falta de penetração, respingo, mordedura ou trincas - cujo aparecimento pode ser facilitado pela fusão da camada de tratamento de proteção com arco elétrico – possuem maior significância de ser analisados e evitados (KAM *et al.*, 2021; MA *et al.*, 2021), com intuito de coibir a redução das propriedades mecânicas do produto e consequentes fraturas.

Nesse sentido, estudos têm sido realizados com a finalidade de reduzir descontinuidades e defeitos em soldagem de aço galvanizado pelos processos GMAW e FCAW (NOGUEIRA, 2015; WICKBOLDT, 2014; YU e CHO, 2017; YU e KIM, 2018; TREVISAN e MAIA, 2007). Todavia, as pesquisas comumente são realizadas a partir da análise de parâmetros isolados, o que precisa ser revisto, levando em consideração as variáveis envolvidas no processo.

Assim, o objetivo geral dessa pesquisa é analisar os efeitos de metais de adição (arames) e gases de proteção nas características de soldagem de aço galvanizado, através da avaliação microestrutural e de propriedades mecânicas.

Os objetivos específicos são:

- Definir qual melhor tipo de condição para soldagem de aço galvanizado;
- Avaliar a camada de zinco após a soldagem;

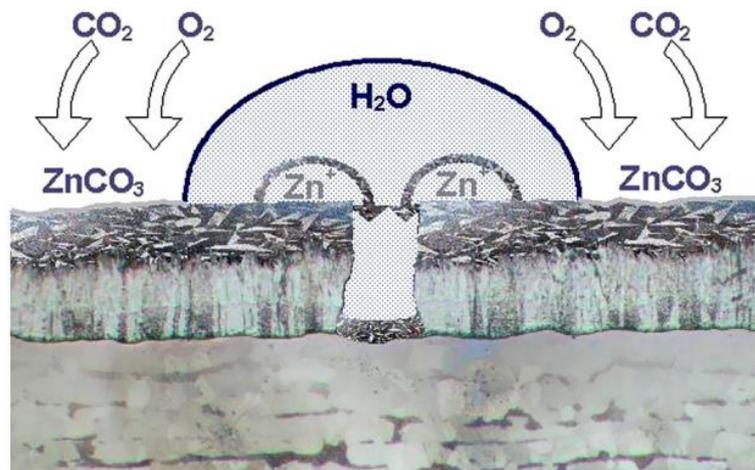
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços galvanizados

Aços galvanizados são aços que passaram por tratamento de proteção que adiciona uma camada superficial de zinco (Zn), conferindo maior durabilidade. Souza e Quintao (2016) apontam que o processo de galvanização dos aços consiste basicamente em adicionar uma camada de zinco no produto laminado e essa camada confere ao aço uma grande resistência à corrosão atmosférica.

O zinco é um metal branco-azulado, apresentado no quarto período e no grupo 2b da tabela periódica, com número atômico 30 e peso atômico de 65,38 u, podendo apresentar grau de pureza de 99,95%. Entre as cinco principais utilizações de zinco no mundo, está o revestimento para aço, incluindo a galvanização, que pode representar até 50% do consumo anual. O zinco é utilizado como metal de sacrifício, pois protege a ocorrência de corrosão no processo de galvanização. Nesse caso, os ânodos de zinco de sacrifício são fixados em estruturas de aço para fornecer proteção na presença de um eletrólito, como água do mar ou solos úmidos (Figura 1). Além disso, o zinco pode ser utilizado como fio de liga, sendo empregado na soldagem de alumínio e para reparação de revestimentos galvanizados danificados. Dessa maneira, ligas de zinco tornaram-se fundamentais para garantir proteção contra corrosão, fator relacionado com a conformabilidade e a capacidade de revestir com sucesso composições de aços difíceis, consideradas propriedades superiores de engenharia (LYNCH, 2001).

Figura 1 – Barreira formada por revestimento de zinco



Fonte: Kuklíl e Kudláček, 2016.

Por apresentar excelente usinabilidade em altas velocidades com desgaste mínimo, o zinco pode ser fixado por uma ampla gama de técnicas de união, incluindo a soldagem. Assim, a superfície de uma fundição sob pressão de zinco é altamente receptiva a muitos acabamentos orgânicos e inorgânicos comerciais, promove maior proteção contra corrosão, como mencionado, e maior resistência ao desgaste. Devido à sua posição em relação ao ferro na série eletromotriz, o zinco preferencialmente corrói em uma célula galvânica dos dois metais. Todavia, o revestimento protetor de zinco se dissolve em uma taxa moderada, pois seu potencial de eletrodo padrão é apenas ligeiramente mais eletronegativo do que os valores para várias reações de ferro. Ademais, o pH é um fator fundamental, visto que entre 5 e 10 forma-se uma película densa e protetora que diminui a taxa de dissolução do zinco, dessa forma, pode ser utilizado para proteger ferro ou aço por longos períodos (LYNCH, 2001).

Além dos fatores descritos, o período do tempo para a ocorrência de corrosão também é diretamente proporcional à espessura do revestimento de zinco aplicado e indiretamente proporcional à taxa de corrosão do zinco em ambientes específicos, sendo esses determinados a partir dos valores das perdas médias anuais por corrosão, que podem ser classificados de acordo com a atmosfera, dividindo-se em seis classes, de C1 (baixa) a CX (extrema). Em condições climáticas normais, os revestimentos galvanizados são capazes de fornecer produtos de aço com proteção anticorrosiva confiável por um considerável tempo. Dessa maneira, em suma maioria das aplicações, esses representam o sistema anticorrosivo mais adequado, eficiente e confiável (KUKLÍL; KUDLÁČEK, 2016).

O aço galvanizado é comumente empregado em aplicações arquitetônicas, de infraestrutura e automotivas, sendo considerado o processo mais ecológico de prevenção contra a corrosão, devido ao zinco ser um elemento natural não tóxico, presente na água e no solo, como consequência de processos naturais (ROSSI; PINAMONTI; CALOVI, 2022). Estima-se que os custos de corrosão em nações industrializadas se aproximem de 4% do Produto Interno Bruto (PIB), percentual ainda subestimado para países emergentes. Cálculos sugerem que a cada 90 segundos, em todo o mundo, uma tonelada de aço passa pelo processo de corrosão. Ao longo do processo para suprir essa perda, a cada duas toneladas produzidas, uma já é para substituir o aço corroído. Assim, a galvanização é a forma de utilizar o zinco para proteger o aço por longos períodos, o que resulta em economia para a indústria e leva a um menor impacto ambiental (ICZ, 2010).

Além dos benefícios já mencionados, o aço galvanizado por ser facilmente reciclado para outras sucatas e as emissões de gases durante o processo são baixas e rigidamente controladas pelos órgãos de proteção ambiental. Os resíduos líquidos gerados durante o

processo, especialmente de ácido, são removidos corretamente por empresas licenciadas para o gerenciamento de resíduos, assim, o processo é considerado bastante limpo (ICZ, 2010).

Vários são os tipos de processos de galvanização, todavia a galvanização por imersão a quente é o mais utilizado. Nesse, os principais elementos de liga do zinco são o alumínio, o silício e, mais recentemente, o magnésio. As etapas desse processo consistem na limpeza, na fluxagem, na galvanização e na passivação (MANHABOSCO, 2017) (Figura 2). Em comparação a outros processos, esse requer baixo custo e menor tempo, o que conseqüentemente influencia no aumento de produtividade (ROSSI; PINAMONTI; CALOVI, 2022).

Figura 2 – Etapas da galvanização por imersão a quente



Fonte: Adaptado de Manhabosco, 2017.

A limpeza, etapa inicial, consiste na eliminação de óxidos e resíduos superficiais, realizada por imersão em temperaturas próximas a 80 °C em produtos desengraxantes (compostos por carbonatos, fosfatos, detergentes, entre outros), seguido por imersão em produto decapante (soluções ácidas com ácido clorídrico entre 15% e 17%) em temperatura ambiente. Após a limpeza, é realizada a fluxagem, uma imersão em solução salina (cloreto de zinco e de amônio) de 1 a 2 minutos.

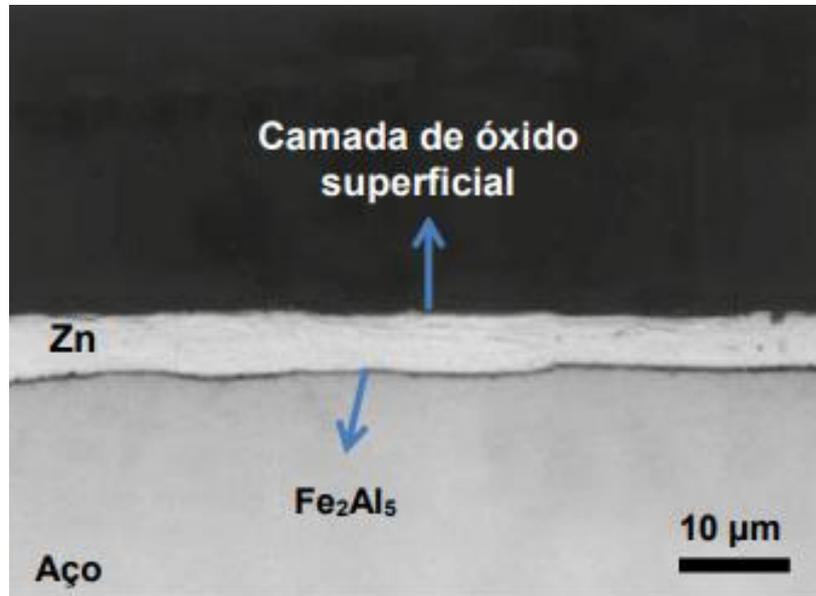
A etapa de maior agregação de valor ao produto, a galvanização, ocorre com a imersão do material em banho de Zn (composições e temperatura de acordo com a liga do produto final preterida), formando camada de proteção que, segundo Manhabosco (2017), varia de 7 µm a 125 µm, dependendo da aplicação final do produto. Por último, a passivação consiste na imersão do material zincado em um eletrólito contendo íons oxidantes para a formação da camada de conversão sobre ele com intuito de aumentar a vida útil da proteção de zinco.

Os aços galvanizados de maior utilização comercial possuem camada de 5 a 20 µm e seu revestimento consiste basicamente em Zn puro na fase Eta, uma fina camada de óxido superficial, e na interface aço/revestimento consiste em uma fina camada intermetálica ferro-alumínio ( $Fe^2Al^5$ ), que promove maior aderência do revestimento (Figura 3).

Feng *et al.* (2014) observou que as morfologias dos óxidos superficiais podem influenciar muito a galvanização do aço na indústria automotiva. A superfície de óxido

semelhante a um nódulo apresenta melhor molhabilidade e camada de inibição do que a superfície de óxido semelhante a um filme vítreo.

Figura 3 – Revestimento de zinco típico em aços galvanizados



Fonte: Manhobosco, 2017.

Segundo Mei *et al.* (2009) os requisitos para melhorar a durabilidade na estrutura de veículos levaram ao amplo uso de aço galvanizado como material resistente à corrosão e especialmente na indústria automotiva. O aço galvanizado de alta resistência pode substituir o aço em geral para reduzir o peso do automóvel e melhorar a segurança, fator importante para a redução do consumo de combustível. Por isso, o aço galvanizado de alta resistência é escolhido como o material ideal para a fabricação de carrocerias de veículos. Joaquin *et al.* (2007) apontam que aços revestidos são a norma da indústria para aplicações estruturais de carrocerias propensas à corrosão em serviço.

Porém, ainda segundo Joaquin *et al.* (2007) esses aços, obtidos tanto pela galvanização por imersão ou eletro galvanização, adicionam um nível de complexidade ao processo de obtenção de soldas de qualidade, devido à tendência de os materiais de revestimento volatilizarem e resultarem em porosidade na solda. Para Souza e Quintao (2016) o fator que dificulta bastante a soldagem de um aço é a presença de uma camada galvanizada que, em geral, provoca durante a soldagem uma maior instabilidade do arco e uma elevação do nível de respingos, levando ao aumento da densidade de poros superficiais e/ ou internos.

O Zn, elemento da camada de proteção superficial, possui baixa temperatura de fusão (420 °C) e evaporação (910 °C). O ponto de fusão do aço carbono se encontra na faixa de 1400

a 1500 °C, ou seja, até 600 °C mais alto que o ponto de ebulição do Zn puro. Com isso, na soldagem a arco elétrico, a vaporização do Zn pode causar instabilidade do arco, impactar na formação de porosidade, na falta de fusão, e levar ao surgimento de trincas, além de danificar a camada galvanizada que protege o aço contra a corrosão (MAIA, 2005).

Esses problemas podem ser minimizados com a utilização de baixos aportes térmicos que contribuem para menor queima da camada de Zn, garantindo arco elétrico mais estável com baixa taxa de respingos. Estudos como os de Narayanan *et al.* (2014) recomendam uso de arame tubular como fator preponderante para melhoria nos níveis de porosidade em juntas de aço galvanizado. Além disso, destacam que os resíduos deixados após a soldagem de aços galvanizados podem afetar a resistência à corrosão, interferindo no processo de revestimento. Há também, para esses autores, a menção de que a produtividade, muitas vezes, diminui com a espessura do revestimento de Zn, devido à geração de porosidades, pois exigem tempo de retrabalho. Os retrabalhos costumam ser de lixamento e novos passes de solda. Outra técnica para mitigar a porosidade é a redução da velocidade de soldagem, que também implica perda de produtividade.

Narayanan *et al.* (2014) apontam para outra particularidade da solda sobre aços galvanizados: a corrosão oriunda da evaporação do Zn durante a maioria dos processos de soldagem. Para minimizar a corrosão, geralmente é necessário um revestimento protetor pós-soldagem, como o revestimento de eletrodeposição (*e-coat*, do inglês *electrodeposition coating*), que consiste em adicionar uma resina polimérica, pigmentos e outros aditivos.

Ademais, Matsui e Shionoya (1998) explicam que o vapor de Zn durante a soldagem pode facilmente escoar se os metais base passarem por vibração e isso contribui para redução de porosidade. Kim *et al.* (2018) investigaram experimentalmente o efeito da porosidade no comportamento à fadiga no processo GMAW com aço galvanizado cuja tensão de escoamento é de 590 MPa e concluíram que a porosidade reduziu significativamente a vida útil do material para cargas entre 122 e 366 MPa, porém, abaixo dessa faixa não houve significância estatística.

O processo de GMAW em aço galvanizado mantém-se um desafio, devido à formação de vapor de Zn e a fragilidade do metal líquido durante a soldagem a ponto de resistência. Na indústria manufatureira é comum haver lacunas entre as chapas de aço revestidas com Zn durante o processo GMAW para evitar porosidade residual, levando em consideração o aprisionamento de vapor de Zn. Todavia, a consistência da solda é prejudicada, pois controlar com precisão o tamanho das folgas durante o processo de soldagem é praticamente impossível. Assim, encontrar técnicas para reduzir essas delimitações é de suma importância para que o processo de soldagem de aço galvanizado por GMAW seja bem-sucedido. Por mais que estudos

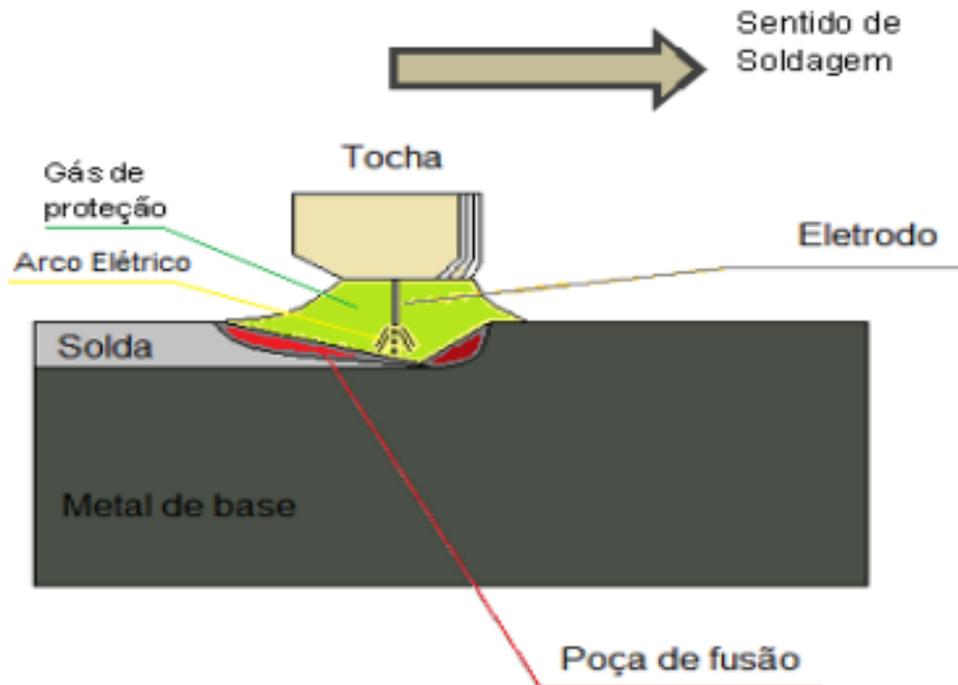
apontem o avanço no uso da técnica, os problemas de defeito de porosidade configuram-se como problemática contínua para a soldagem GMAW de aço revestido de Zn (KAM et al., 2021). Assim, estudos voltados para entender comportamento e características da soldagem em aços galvanizados são de grande relevância.

Com foco em atingir melhores condições para uso deste material na indústria automotiva, Yu e Cho (2017) realizaram experimentos que mostram que a viscosidade da poça de fusão diminuiu após a redução dos teores de Mn e Si, sendo que esse efeito promoveu a emissão de vapor de Zn da poça de fusão. Além disso, os autores apontam que se pode avaliar que o teor de C raramente afeta a emissão de vapor de Zn, embora tenha afetado a dureza das juntas soldadas. Shreyas, Panda e Vishwanatha (2021) concluíram que a difícil estabilização de arco implica necessidade da entrada de calor e temperatura entre passes serem mantidas baixas. Já Ishak *et al.* (2012) estudaram o efeito do aporte térmico nas propriedades mecânicas de um aço galvanizado soldado e descobriram que as propriedades de tração diminuem com o aumento da entrada de calor devido ao aumento das tensões residuais. Ademais, Ferrari (2022) testou e validou o uso soldagem por fricção por ponto para aços galvanizados, inclusive quando combinados em juntas dissimilares de ligas de alumínio.

## 2.2 Soldagem GMAW

A soldagem do tipo GMAW (em inglês, *gas metal arc welding*) é o método metalúrgico de união de dois ou mais componentes metálicos em que, segundo Marques (2009), através da formação de arco elétrico (como fonte de calor) protegido por gás e um eletrodo (arame) é fundido e depositado sobre a junta de união e essa união, se aplicada dentro de parâmetros de confiabilidade, possui resistência mecânica superior ao metal base. Esse tipo de soldagem tem sua representação apresentada na Figura 4, em que a alimentação do arame é feita mecanicamente através de alimentador e a transferência metálica acontece basicamente por dois mecanismos: quando há o contato da gota com a poça antes do destacamento (transferência por curto-circuito) ou quando a gota se desprende antes do contato com a poça (transferência por voo livre) e sob esse processo há a proteção de elemento gasoso. Em virtude desta necessidade de gás de proteção, a soldagem GMAW não é indicada para ambientes abertos a correntes de ar.

Figura 4 - Processo de solda GMAW



Fonte: Souza e Quintao, 2016.

Os principais atributos desse processo são a alta aplicabilidade quanto ao tipo de material e espessura, grande disponibilidade de maquinário e insumos no mercado e a possibilidade de automação. Segundo Joaquin *et al.* (2007) a versatilidade e velocidade do processo são os fatores fundamentais para escolha desse nas soldas de médio e alto teor de carbono. Para Yu e Kim (2018) a soldagem GMAW é o processo de soldagem mais comum para soldagem de peças de chassis de automóveis devido à sua alta produtividade, versatilidade e relativa facilidade de adaptação do processo à automação robótica.

Em contrapartida, a versatilidade do processo traz consigo limitações consideráveis, como a grande sensibilidade aos parâmetros elétricos de operação do arco, gerando defeitos que podem ser potencializados quando o material base utilizado é o aço galvanizado, especialmente devido a camada superficial protetiva de Zn (MA *et al.*, 2021).

No processo GMAW o metal de adição é o arame alimentado de forma contínua pela fonte de soldagem. Esses arames correspondem a ligas metálicas com propriedades e composição química controladas. Para soldagem de aços carbono, por exemplo, o tipo mais utilizado são os cobreados, devido ao cobre proteger o arame contra a corrosão e melhorar o contato elétrico entre esse e o bico de contato na tocha de soldagem (MARQUES, 2009). Os arames para soldagem de aços, em geral, podem ter seção inteiramente metálica, chamados arames sólidos, ou ser do tipo tubular, formado por uma camada metálica fechada e ter um enchimento interno.

A estabilidade do arco elétrico pode ser considerada um indicador-chave da eficiência da operação de soldagem, estando diretamente relacionada a outros indicadores de qualidade, tais como os respingos. Por mais que o GMAW seja considerado econômico, sendo amplamente utilizado na indústria de soldagem para fabricação de soldas de alta qualidade, por exemplo, a estabilidade no processo ainda causa preocupações. Atualmente, não são encontrados conceitos de estabilidade unificada sobre o processo de soldagem, visto que cada pesquisador ao estudar sobre o assunto, compreende o processo de maneira diferente e aplica diferentes indicadores de estabilidade (KAH *et al.*, 2022).

De acordo com Scotti e Ponomarev (2008) a avaliação de estabilidade pode ser realizada considerando os níveis aceitáveis de respingos e fumos, ausência de descontinuidades, boa penetração, bom acabamento do cordão de solda e das propriedades do gás de proteção e dos consumíveis utilizados. Puñales e Alfaro (2021) em sua revisão sobre estabilidade no processo GMAW apontam que, em suma, os pesquisadores podem considerar três fatores principais, sendo o comportamento operacional do processo de soldagem, a estabilidade do arco e a regularidade da transferência metálica. Os fatores não podem ser considerados isolados, visto que esses são influenciados pelo comportamento dinâmico do processo de soldagem. Assim, compreende-se que afetando um dos aspectos, um efeito dominó pode ocorrer, reduzindo drasticamente a qualidade da soldagem.

A estabilidade do arco é influenciada por parâmetros do processo, tais como o comprimento do arco, que pode levar a desestabilização, pois produz variações na intensidade da corrente de soldagem e na tensão do arco. Todavia, quando a tensão é muito pequena e o comprimento do arco é curto, a gota não cresce totalmente e entra em contato com a poça de fusão. Além do anteposto, a velocidade de alimentação do arame influencia drasticamente na estabilidade, pois ao aumentar as taxas de alimentação do arame, o diâmetro da gota diminui e valores muito altos ou muito baixos podem tornar o processo instável. Entretanto, o grau de influência depende do gás de proteção utilizado, bem como, da tensão de soldagem (PUÑALES; ALFARO, 2021).

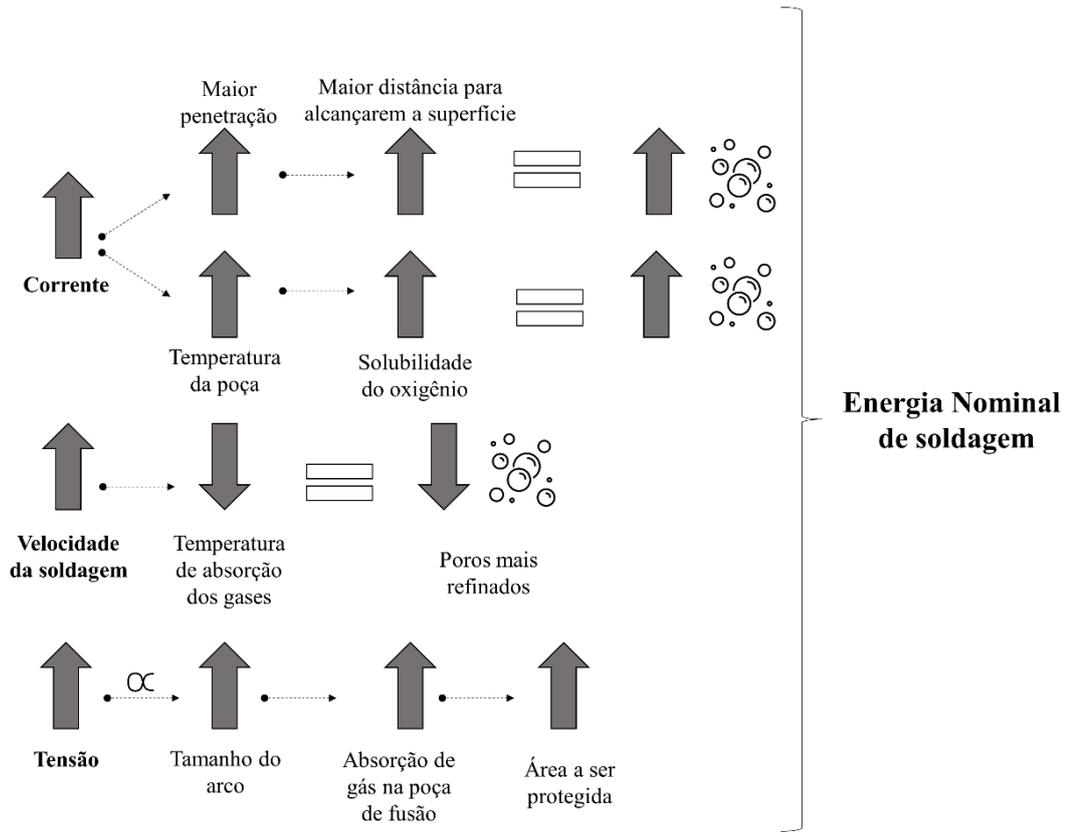
Esse tipo de soldagem tem ampla gama de aplicações e pesquisa, tais como com aços *dual-phase*, em que Silva (2021) constatou que GMAW é uma alternativa bastante viável para indústria automotiva, apresentando resultados aceitáveis em relação a resistência à tração e alongação máxima. Hong *et al.* (2023) demonstraram que na solda GMAW associada a metal base aço galvanizado, o controle de porosidade e estabilização de arco pode vir com espaçamentos controlados de 0,5 mm entre as juntas soldadas, pois estes reduzem o aporte térmico.

### 2.2.1 Parâmetros de soldagem

O controle dos parâmetros de soldagem é fundamental na soldagem GMAW, pois esses determinam a entrada de calor durante o processo, as condições de resfriamento e o tempo durante o qual a microestrutura e a geometria da solda são formadas (MVOLA; KAH; LAYUS, 2018). Em função de se tratar de um processo de arco elétrico, a soldagem GMAW tem para a estabilização do arco a necessidade de manter em níveis de controle a corrente e tensão elétrica. A essas duas variáveis, adiciona-se ainda a velocidade de soldagem, como parte fundamental para quantificar a energia nominal de soldagem e seu grau de aporte térmico. Portanto, diversos fatores interferem no processo de soldagem, tais como, a corrente, a tensão, a velocidade empregada, o tipo do gás de proteção, a vazão do gás de proteção, o metal de adição e a espessura utilizada (Figura 5). A realização de soldagem sem adequar os parâmetros, por exemplo, a realização de cálculo incorreto de tensão e corrente, bem como, uso de gases e/ou diâmetros de arames inadequados podem gerar discontinuidades e defeitos graves, gerando excesso de respingos, falta de fusão e aumento de porosidade, que acarretam sérios danos ao produto, conseqüentemente impactando em custos extras para que seja possível sanar os problemas posteriormente. Na ocorrência de um defeito durante o processo de soldagem, várias instabilidades se refletem no arco de soldagem, na corrente e na tensão (WICKBOLDT, 2014; SUMESH *et al.*, 2018).

Os equipamentos que são utilizados na soldagem GMAW possuem características de tensão-corrente horizontal, onde mantêm-se o comprimento do arco constante. Ademais, os mecanismos de alimentação de arame funcionam de maneira que a velocidade empregada também mantenha constância, independentemente de variações do comportamento do arco elétrico. Denominado como “autorregulação”, nesse sistema se o comprimento do arco variar, a intensidade de corrente também irá variar significativamente, o que, conseqüentemente, provoca alterações da taxa de fusão do arame para compensar essa variação de comprimento. Dessa forma, se houver aumento de comprimento, há redução da intensidade da corrente e da taxa de fusão do arame, fazendo com que ponta desse arame se funda mais tardiamente e o comprimento do arco elétrico retorne ao comprimento original. Para reduzir o comprimento do arco elétrico, por sua vez, é necessário que a intensidade da corrente seja aumentada. Todas as variações descritas ocorrem rapidamente (COSTA, 2017).

Figura 5 – Fatores que interferem no processo de soldagem e suas relações com a energia nominal da soldagem



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir do pressuposto que a corrente e a tensão de soldagem são variáveis de assinatura, que podem apontar a qualidade da soldagem e servir para o monitoramento em tempo real, o trabalho de Thekkuden, Mourad e Sherif (2020) explorou a interação entre parâmetros de soldagem a arco de metal a gás, com distância de separação, vazão de gás e velocidade transversal com a média e desvio padrão da tensão e corrente de soldagem. Os autores descrevem que a distância de afastamento foi o fator mais relevante encontrado, e a mudança na taxa de fluxo de gás afeta significativamente a tensão, mas pode não alterar a corrente de soldagem.

Segundo Nogueira (2015) no processo MIG/ MAG a intensidade da corrente engloba valores na faixa dos 30A até valores superiores a 600A, e tem influência direta na taxa de fusão, no modo de transferência metálica e nas características geométricas do cordão. Sendo assim, sua regulagem vai depender da espessura das peças a serem unidas ou revestidas e das características desejadas dos cordões de solda.

O uso de correntes muito elevadas leva a um aumento no nível de porosidade, o que pode ser atribuído ao fato de que valores elevados de corrente de soldagem levam ao aumento

na temperatura da poça de fusão, o que aumenta a solubilidade do oxigênio e outros gases na poça, e como a solubilidade dos elementos formadores de gases é bem menor no metal sólido, com o resfriamento e conseqüente solidificação do metal de solda, esses elementos são rejeitados no metal líquido à frente da interface de solidificação, levando à formação de bolhas de gás que podem vir a ser aprisionadas, formando poros (SILVA; MACIEL, 2023). Ao aumentar a corrente de soldagem, aumenta-se a penetração, e quanto maior a penetração, maior é a distância que as bolhas de gás têm que atravessar para escapar pela superfície. Isso aumenta a probabilidade de essas serem aprisionadas e formar poros (TREVISAN; MAIA, 2007; VIDYARTHY; DWIVEDI, 2016).

A tensão, por sua vez, tem um papel importante, visto que é diretamente proporcional ao tamanho do comprimento do arco e, quando maior esse comprimento, maior também a absorção de gás na poça de fusão, pois há aumento na área a ser protegida (VIANA, 2003).

Outra variável importante é a velocidade de soldagem, que tem no seu aumento uma redução na quantidade de poros. Essa redução se atribui ao fato de com velocidades de soldagem maiores, reduz-se o tempo disponível para a absorção de gases. Com altas velocidades de soldagem os poros tendem a ser refinados, enquanto com baixas velocidades eles tendem a se coalescer, tornando-se mais grosseiros, sendo o tamanho dos poros governado pelo tempo disponível para nucleação e crescimento durante a solidificação do metal de solda (TREVISAN; MAIA, 2007; XIONG *et al.*, 2021).

Essas variáveis se relacionam na chamada energia nominal de soldagem, que traduz o aporte térmico à solda e afeta diretamente a porosidade do cordão de solda e relaciona a eficiência de transferência ( $\eta$ ) própria de cada material, tensão (U), corrente elétrica (I) e velocidade de soldagem ( $v$ ). Quanto maior essa energia, maior é o tempo disponível para os gases escaparem para a atmosfera sem serem aprisionados pela frente de solidificação. A energia nominal pode ser aumentada com elevação da tensão e corrente do arco e redução na velocidade de soldagem, e, assim, favorecendo a saída dos gases e menor porosidade. Segundo Trevisan e Maia (2007) há uma aparente contradição entre influência dos parâmetros de soldagem na porosidade individualmente analisados *versus* quando combinados, o que reflete na complexidade da soldagem.

Dentre os parâmetros de soldagem, o tipo de junta tem considerável influência no grau de porosidade, pois quanto mais estreita e profunda for a junta, maior a tendência de retenção dos gases, aumentando a dificuldade de os gases escaparem e a probabilidade de porosidade. Por outro lado, com abertura de raiz a tendência à retenção de gases é menor, ajudando a minimizar a porosidade. Segundo Souza e Quintao (2016) o aumento da distância da

extremidade do bico de contato até a peça (DBPC) aumenta a taxa de deposição, podendo contribuir positivamente para redução de porosidade dentro de limites controlados.

Tão fundamental quanto a escolha de parâmetros adequados para soldagem está a preparação das superfícies dos metais base. A presença de água e hidrocarbonetos como óleos e graxas na região resulta em hidrogênio com efeito do arco elétrico, enriquecendo esse gás na poça de fusão (TREVISAN; MAIA, 2007).

### 2.2.2 Gás de proteção

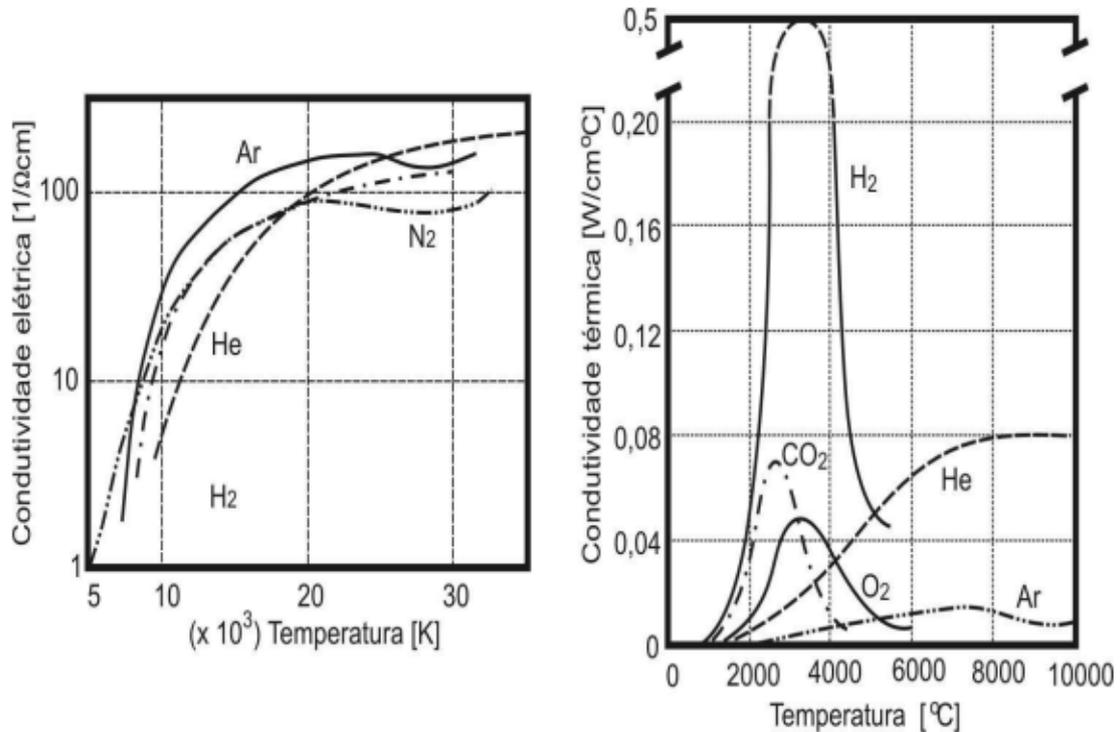
Os gases utilizados como gás de proteção atuam na proteção da poça de fusão da atmosfera que envolve o arco, embora, muitas vezes, tenham outros papéis, como, por exemplo, a estabilização do arco. No processo GMAW, o gás de proteção pode ser classificado como inerte (processo MIG, indicado para solda de materiais não ferrosos) ou ativos (processo MAG, gás ativo reage com o material do cordão de solda). Os gases inertes mais usuais são o argônio e o hélio, e entre os gases ativos destacam-se o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o oxigênio ( $\text{O}_2$ ) (TATAGIBA; GONÇALVEZ; PARANHOS, 2012), sendo esses empregados para soldagem de aço galvanizado.

Segundo Maia (2005) apesar de suas características benéficas, muitas vezes são os próprios gases de proteção os responsáveis por defeitos no processo de soldagem. Entre esses defeitos está a porosidade e, direta ou indiretamente, o gás de proteção pode afetá-la através da introdução no metal de solda de elementos presentes na própria composição do gás de proteção, como o oxigênio, da contaminação do gás de proteção (ar) ou de seu próprio aprisionamento no metal de solda.

A composição de gases de proteção costuma ser binária, pois há dificuldade na estabilização do arco com Ar puro (gás inerte). Soluções costumeiramente usadas são a adição de  $\text{O}_2$  ou  $\text{CO}_2$  na composição do gás de proteção. Porém, em algumas aplicações, utiliza-se  $\text{CO}_2$  puro como gás de proteção. Adições de até 5% de  $\text{O}_2$  em argônio (Ar) não acarretaram mudanças na porosidade. Porém, teores acima de 5% elevaram significativamente o nível de porosidade no metal de solda (MAIA, 2005).

Já o  $\text{CO}_2$  se dissocia em O e monóxido de carbono (CO) e a característica oxidante desse implica no aparecimento de poros e a sua proteção apresenta condutividade térmica maior que Ar (Figura 6), gerando assim, tensão do arco mais elevada e maior aporte térmico.

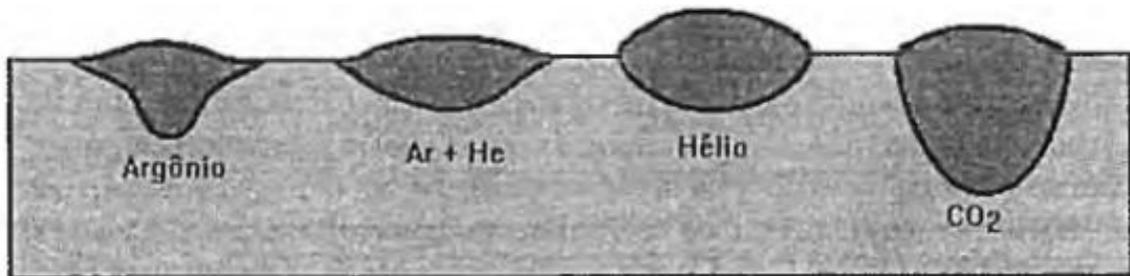
Figura 6 – Condutividade elétrica e térmica de gases



Fonte: Viana, 2003.

Cada tipo de gás de proteção escolhido, ou mistura de gases, traz um comportamento distinto de tipo de cordão de solda para a soldagem, o que inclui o ocorrido no caso do aço galvanizado, em que se destaca o aumento da profundidade de cordão quando usado CO<sub>2</sub> (Figura 7).

Figura 7 – Perfis característicos de cordões de solda com diferentes gases de proteção



Fonte: Marques, 2009.

De acordo com Maia (2005), alternativas para desoxidar a poça passam pela adição de elementos que provocam adição ao oxigênio no eletrodo, como o manganês, silício e alumínio, formando óxido de manganês (MnO), óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) e óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),

respectivamente. O efeito do oxigênio corrobora a decisão da norma AWS de excluir ele como gás protetor de arames tubulares de aço inoxidável.

Nogueira (2015) discorre sobre a mudança do CO<sub>2</sub> puro para a mistura de CO<sub>2</sub> e Ar reduzir o tempo médio de curtos-circuitos, essa redução proporciona uma melhoria na estabilidade do arco, visto que esse menor tempo de curto-circuito induz a um menor tempo de arco apagado. Miranda (1999) esclarece que o tipo de gás também influencia na formação do arco voltaico gerando mudanças na geometria do cordão. O arco gerado com CO<sub>2</sub> puro tende a ser mais constricto, diminuindo a largura do cordão e aumentando o seu reforço. A maior constrição do arco, para o CO<sub>2</sub>, provoca também uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, o que causará uma maior penetração. A solda com Ar + CO<sub>2</sub>, por sua vez, tende a apresentar uma maior largura e um menor reforço, pois o arco gerado por esse tipo de gás incide numa área maior do metal de base, fato evidenciado no estudo de Farias, Luz e Rodrigues (2002). Para o arame tubular soldado com mistura 75% Ar + 25% CO<sub>2</sub>, a resistência à tração e escoamento da junta soldada são superiores que o produzido com soldas somente com CO<sub>2</sub>. Porém, os gases ativos em geral, tais como CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> tem como característica negativa a produção de respingos de solda (VIANA, 2003).

Para Viana (2003) Ar e hélio (He) são os gases protetores mais eficientes pela sua característica de ser inerte. Na Europa e nos Estados Unidos, a utilização de He tem sido amplamente observada em solda de aços austeníticos inoxidáveis, visando o aumento da fusão do metal de base. Por sua vez, o Ar é mais adequado para soldagem de materiais finos, com baixa condutividade térmica e, especialmente, fora de posição, permitindo transferência por *spray* (diferentemente do He).

Já hidrogênio, de acordo com estudos de Viana (2003), confere pouca estabilidade ao arco, aumenta o aporte de calor devido ao seu baixo potencial de ionização e possui a mais alta condutividade térmica dentre os gases, estreitando o arco e aumentando a concentração de energia, vinculada, por sua vez, a uma maior penetração. Além disso, detém alta entalpia e propriedade redutora, combinando com o oxigênio e evitando a formação de óxidos. Mesmo em baixos teores, a adição do hidrogênio ao argônio aumenta em até 30% a quantidade de metal fundido na soldagem MIG de aços inoxidáveis.

Para aços galvanizados, estudos têm sido realizados especialmente nos últimos anos, em que são testadas combinações com diferentes concentrações dos gases de proteção. Shreyas, Panda e Kumar (2020) realizaram o teste de soldagem com mistura de Ar + 2% O<sub>2</sub>, bem como com 96% Ar + 2% He + 2% O<sub>2</sub>, e com e sem a presença de revestimento galvanizado na solda. Os resultados apontam que a resistência ao impacto foi maior quando a camada galvanizada foi

removida do local da solda. Com o revestimento presente verificou-se que a resistência ao impacto foi maior com o uso de 96% Ar + 2% He + 2% O<sub>2</sub>. Ao avaliar a quantidade de respingos na soldagem de aço galvanizado de acordo com o gás de proteção, Jeong, Cho e Jung (2016) afirmam que mesmo utilizando Ar e CO<sub>2</sub> a 5% ou 25% não se verificou qualquer alteração na quantidade de respingos. Todavia, ao utilizar Ar e CO<sub>2</sub> a 10%, houve quantidade mínima de respingos. O que demonstra que taxas baixas ou muito altas de CO<sub>2</sub> impactam diretamente nesse parâmetro.

Bang *et al.* (2016) ao avaliar três combinações de gases de proteção em aço galvanizado, sendo 85% Ar + 15% CO<sub>2</sub>, 90% Ar + 10% CO<sub>2</sub> e 95% Ar + 5% CO<sub>2</sub>, destacam que as melhores condições foram observadas ao utilizar 95% Ar + 5% CO<sub>2</sub>. Diferentemente do que foi encontrado por Jeong, Cho e Jung (2016), visto que na pesquisa de Bang *et al.* (2016) realizou um processo de soldagem híbrida laser-arco. Assim, verifica-se que a técnica pode interferir no resultado, assim como as concentrações dos gases de proteção.

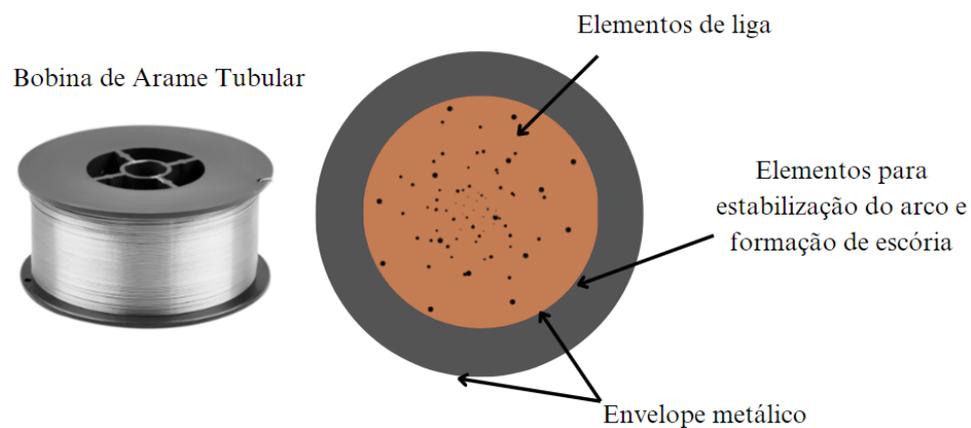
Se ausência (ou falha de alimentação) do gás de proteção é prejudicial a qualidade da solda, a vazão de gás excessiva também pode trazer problemas na junta soldada, devido elevada turbulência na poça de fusão. A presença de turbulência no metal de solda líquido pode aumentar as trocas gasosas entre o metal líquido e a atmosfera. Além disso, a turbulência pode impedir que o metal de solda se acomode na junta antes de se solidificar. Caso o metal de solda se solidifique e não tenha preenchido todos os vazios presentes na junta, a formação mecânica de poros é favorecida. Além disso, vale frisar que a presença de respingos e impurezas no bocal pode contaminar o gás de proteção ou trazer um suprimento insuficiente desse gás, contribuindo para o aparecimento de poros (MAIA, 2005). Por esse fator de interferência dos gases para soldagem de aço galvanizado é importante pesquisar diferentes concentrações desses, e ao mesmo tempo, realizar testes mesclando os tipos de gases de proteção e cuidando para realizar o uso adequado.

### **2.3 Arame tubular**

Arares tubulares são formados por um eletrodo metálico tubular oco que apresenta fluxos em pó em seu interior, sendo esse apropriado para proteção do arco e do cordão, por exemplo. Assim, sua configuração é dada por um invólucro metálico preenchido por pó, composta por parte de material metálico e outra não metálico. A parte que é formada por material não metálico exerce diversas funções, como geração de gás de proteção para soldagem, produção de escória, acrescentar elementos de liga, estabilização de arco e retirada de oxigênio,

de nitrogênio e de hidrogênio (MARQUES, 2009). Os fluxos internos podem contar diferentes ingredientes, tais como ferroliga, minerais, desoxidantes, ou outros tipos que forneçam escória ou gases de proteção. Com exceção dos arames autoprotégidos, todos os outros tipos de arames tubulares necessitam de gás de proteção externa. Os arames tubulares são utilizados comumente com a finalidade de aumentar a produtividade, consequentemente impactando a competitividade empresarial e reduzindo os custos de proteção (AVENTA, 2020) (Figura 8).

Figura 8 – Bobina e forma de seção transversal de arames tubulares



Fonte: Adaptado de Assis et al., 2017.

A fabricação dos arames tubulares é realizada a partir de bobinas de fitas metálicas e inclusão do pó denominado fluxo. Continuamente, a fita é alimentada e vai deformando-se por meio de rolos conformadores, ficando em forma de “U”. Na sequência desse processo, preenche-se com o fluxo, formando-se assim o arame. Em rolos de fechamento, a fita adquire a forma de tubo, com o fluxo na parte interna. O arame tubular é incluído em um processo mecânico, a fim de reduzir o diâmetro, podendo ser por laminação e/ou por trefilação. Após, já no final da linha de produção, o arame sai em carreteis de aproximadamente uma tonelada, seguindo para o forno e, posteriormente, para o processo de bobinamento, onde os arames são enrolados em bobinas menores, comumente de 15 kg (ASSIS *et al.*, 2017).

Foi em meados dos anos 1950 que ocorreu a introdução da combinação do gás de proteção CO<sub>2</sub> com eletrodos contendo fluxo interno, conhecidos como arames tubulares, porém, a evolução desses arames foi prorrogada com o desenvolvimento do eletrodo revestido (Barbedo, 2011). Esses arames podem ser classificados pelo tipo de proteção gasosa e pelo tipo de fluxo da seguinte maneira:

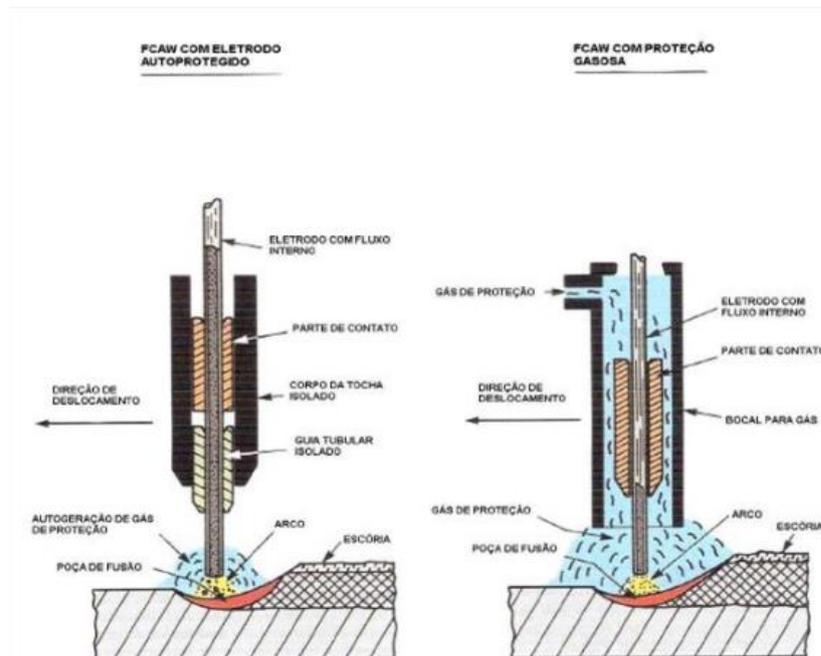
- Arames tubulares com proteção gasosa;

- *Metal cored* (fluxos com pós metálicos) – Arames metálicos;
  - *Flux cored* (fluxos com pó não metálicos) – Arames rutilicos e básico.
- Arames tubulares autoprotégidos.

Segundo Marques (2009) o arame com proteção gasosa tem um fluxo convencional similar ao usado na soldagem com eletrodos revestidos. Os arames tubulares autoprotégidos são preenchidos com fluxo interno capaz de gerar toda a proteção gasosa necessária ao processo e são indicados para ambientes externos onde há dificuldade de manuseio de cilindros de gás. A soldagem autoprotégida, se dá através da decomposição e vaporização do núcleo de fluxo pelo calor do arco. Já com proteção gasosa, se adiciona um gás protetor à ação do fluxo (Figura 9).

Entre os benefícios do uso do arame tubular estão a produtividade, devido a soldagem contínua, e a qualidade da junta soldada, devido ao fluxo. Sua característica compila três tipos de técnicas e processos: eletrodo revestido, MIG/ MAG e arco submerso, pois conta com fluxo como substituto do revestimento do eletrodo, fornecimento contínuo do arame e escória protetora do metal. Além disso, segundo Viana (2003), é um processo que aceita todas as posições de soldagem, visto que há grande gama de arames no mercado.

Figura 9 – Diferença entre arame tubular autoprotégido e com proteção gasosa



Fonte: Marques, 2009.

O uso do arame do tipo tubular se dá com técnicas manuais ou semiautônomas de soldagem e são usados em ampla faixa de espessuras do metal base, preferencialmente a partir de 1,5 mm. De acordo com Viana (2003) a soldagem por arame tubular é um processo a arco elétrico que utiliza arame cuja proteção do arco e da poça de fusão contra a contaminação atmosférica ocorre com auxílio de fluxo contínuo e deposição de um fino revestimento de escória, protetor do metal de solda em solidificação. Assim, a proteção é garantida, ou exclusivamente pelo fluxo contido em seu interior, ou pelo gás adicional fornecido externamente. Segundo Fortes *apud* Barbedo (2011, p. 22) além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação.

Na soldagem com o processo MIG/MAG, toda a seção transversal do arame conduz corrente, enquanto para o arame tubular a corrente é conduzida pela fita metálica que envolve o fluxo, resultando então em maior densidade de corrente e maior ação do efeito Joule sobre a taxa de fusão. Além disso, o arame tubular proporciona maior estabilidade de arco (NOGUEIRA, 2015).

Comparando-se arame tubular com eletrodo revestido, pode-se afirmar que aquele é menos versátil, requer equipamento mais caro, além de gás de proteção, mas traz como benefícios uma velocidade maior, maior penetração e redução de descontinuidades (VIANA, 2003). Porém, segundo Widgery *apud* Nogueira (2015) à medida que se trabalha com uma corrente de soldagem maior, as taxas de deposição com arames tubulares aumentam e o arame tubular do tipo *metal cored* e os arames sólidos apresentam comportamentos similares.

Com o desenvolvimento da fabricação de arames tubulares com diâmetros cada vez menores, tornou-se possível realizar a soldagem em qualquer posição e qualquer tipo de junta (AVENTA, 2020). Todavia, mesmo com os avanços, a fim de manter a estabilidade, alguns parâmetros precisam ser mantidos, tais como a velocidade de alimentação do arame, pois quando aumentada ou diminuída pode interferir na estabilidade, bem como, deve haver o mínimo de interrupção possível durante a operação de soldagem. Esses dois parâmetros, ou seja, velocidade e interrupção podem ser consideradas duas entidades essenciais do processo (KAH *et al.*, 2022).

Todavia, além desses, outros fatores podem comprometer ou melhorar o processo. Em estudos para reduzir porosidade de soldagem de aço galvanizado, Kodama *et al.* (2013) fabricaram arame tubular com baixo teor de Si e Mn e, ao comparar descarga de vapor de Zn

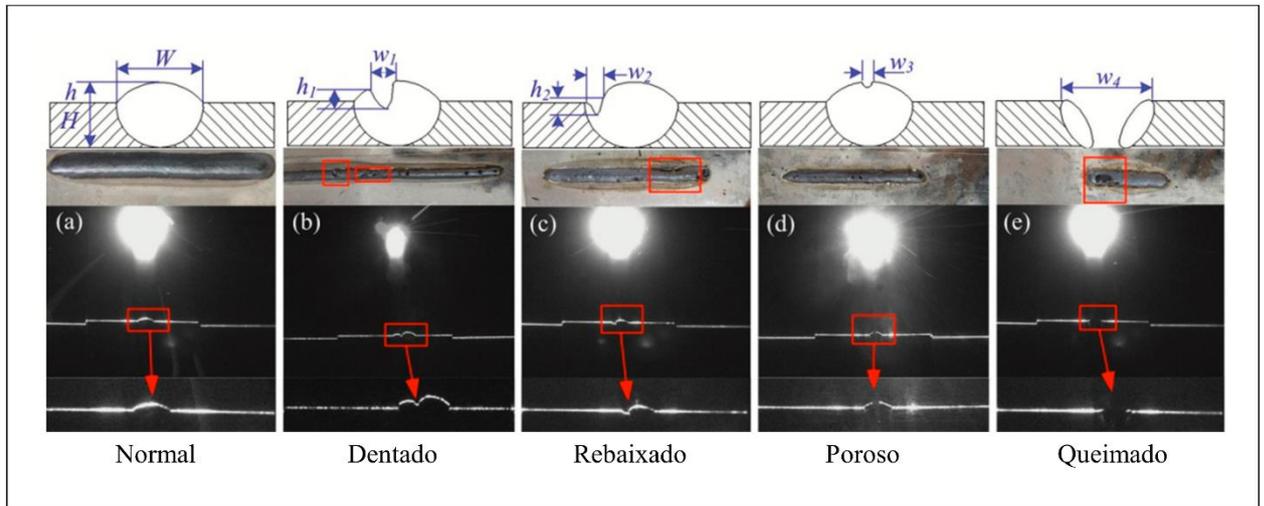
com soldagem usando arame convencional, perceberam vantagem ao desenvolvido e de Izutani, Yamazaki e Suzuki (2013), em que arame tubular de fluxo contínuo foi empregado em soldagem GMAW de aço galvanizado para melhorar descontinuidades de solda em processo de *Cold Metal Transfer* (CMT). No entanto, há poucos estudos que elucidam conclusões sobre uso de arame tubular em soldas de aço galvanizado e seus efeitos nas descontinuidades de solda, porém Yu e Cho (2017) descrevem que há relações convincentes entre alguns elementos do arame e grau de porosidade. Os elementos de mais significativa relação são o Si e Mn. Isso é explicado, pois de acordo com Kodama et al. (2013), conforme níveis de Mn decrescem, o mesmo ocorre com a viscosidade e tensão superficial da poça. Da mesma forma o aumento de Si no arame gera aumento da viscosidade de tensão superficial da poça.

Pessoa (2007) relatou que a porosidade, além de variar com a profundidade, depende também do tipo de revestimento do eletrodo, demonstrando ainda que eletrodo rutílico produz soldas com menor porosidade quando comparado ao eletrodo básico. Porém, arames rútilicos operam normalmente em altas correntes com uma transferência *spray* projetada não axial. Arames básicos operam com transferência globular não axial a correntes elevadas e curto-circuito para correntes reduzidas, ao se comparar a transferência entre tipos de arames tubulares. Dessa forma, compreender mais o uso de arame tubular em soldagem de aço galvanizado é fundamental para otimizar os processos, diminuindo descontinuidades no material.

## **2.4 Defeitos na soldagem de aço galvanizado**

Os defeitos de soldagem são conhecidos indicadores que demonstram a qualidade do processo e ocorrem principalmente pela imperfeição em etapas de fusão ou quando ela se faz incompleta; na penetração incompleta da raiz, que ocorre quando a solda é realizada em uma junta de topo de lado único; na ocorrência de excesso ou incompleta penetração; além da formação de trincas a frio ou a quente, afetando o potencial excesso de metal de solda e a formação de poros (Figura 10). Essas falhas geram formas dentadas, porosas, com queimas e com deformação que ocorrem da relação incorreta dos parâmetros da solda e influenciam a qualidade e durabilidade do processo nomeado de Especificação de Procedimento de Soldagem. Essa especificação é composta por todas as informações relevantes para o soldador completar o processo como a velocidade de deslocamento, diâmetros do fio, corrente de soldagem, tensão do arco e composição e vazão do gás de proteção (BABKIN; GLADKOV, 2016).

Figura 10 – Ilustração de diferentes tipos de defeitos de solda



Fonte: Ma *et al.* (2021).

O estado de penetração é um fator que afeta seriamente o desempenho da junta. Por vezes, o processo de soldagem ocasiona excesso de calor pelo impacto contínuo do arco na superfície do metal. No caso de soldagem em peças especiais que demandam alta temperatura e pressão, a penetração pode ocorrer de forma parcial e excessiva. A relação da poça de fusão e a qualidade da solda pode ser mensurada a partir de processamento de imagens digitais, detecção de infravermelhos, de raios-X, entre outros (GAO *et al.*, 2023).

As imagens digitais se destacam pela maior disponibilidade e facilidade em adquirir os resultados. No trabalho de Chen, Hu e Wu (2019) foram utilizadas imagens digitais do lado superior da poça de fusão obtida utilizando uma câmera que resultava em imagens 2D. No entanto, a falta de um terceiro quadrante, ou seja, uma imagem 3D, carece de resultados referentes a profundidade da superfície da poça de fusão. Para um correto julgamento da precisão de uma solda é necessário obter o limite e área da poça de fusão em confluência com a sua profundidade. Por isso, a utilização de imagens 3D é fundamental para um correto julgamento do processo de soldagem frente a penetração.

A soldagem GMAW aplica calor para gerar um arco elétrico com proteção de gás e consome um metal de adição a ser soldado no metal base de interesse. Devido à alta taxa de deposição do metal de adição, esse processo se torna crítico em escala de produção industrial (CHACÓN-FERNÁNDEZ, S.; PORTOLÉS GARCÍA, A.; ROMANÍ LABANDA, G, 2022). Essa deposição de metal tem uma alta interferência na microestrutura das juntas e precisa que seus parâmetros sejam devidamente analisados para atingir um aceitável equilíbrio do sistema de soldagem.

O efeito de formação de gotas é considerado severo e é induzido pela diferença entre o ponto de fusão entre o aço e o Zn. Na soldagem de arco, a evaporação do Zn aumenta o seu volume e resulta em respingos para fora através de uma poça de fusão relativamente baixa. Esses respingos de solda resultam em excesso de material e criam defeitos de solda como bolhas e poros. Kim *et al.* (2018) conseguiram evitar os defeitos das soldas com a evaporação e oxidação do Zn. Há também uma relação entre a soldabilidade e os parâmetros de distância do feixe-arco do laser, da corrente de soldagem e da velocidade de soldagem (KIM *et al.*, 2008).

As rachaduras ou trincas é outra falha comum em processos de soldagem. No processo aplicado ao aço galvanizado, o Zn é parcialmente queimado pelo calor do arco, pois vaporiza em torno de 906 °C. As rachaduras são formadas no aço por conta de parte do Zn fundido ainda condensar e penetrar na superfície. Para amenizar os problemas de rachaduras no aço, pode-se utilizar a escovação elétrica, porém o tratamento pode não ser totalmente efetivo e resultar em manchas do zinco na superfície do aço (SHREYAS; PANDA; KUMAR, 2020).

A porosidade, ou a existência de poros (orifícios) na junta soldada, é resultado do aprisionamento mecânico e supersaturação de gases dissolvidos, ou gases produzidos por reações químicas. Esse aprisionamento de gás ocorre durante solidificação ou em depósito de *spray* térmico. A porosidade provoca a redução dos limites de escoamento e de ruptura, de ductilidade e de tenacidade. Segundo Maia (2005), a porosidade pode ser considerada um concentrador de tensões com grande influência em falhas de esforços mecânicos, como de fadiga. Os principais fatores que afetam a porosidade no metal de solda são: profundidade da junta soldada, tipo de revestimento do eletrodo e estabilidade do arco (ARIAS; BRACARENSE, 2015). Para Narayanan *et al.* (2014) há uma redução dramática na capacidade de carga da junta quando a porosidade é maior que 10% da área total do cordão de solda. Usualmente, a porosidade é vista na região superficial das juntas soldadas e tem como aspecto visual a existência de orifícios de descontinuidade (Figura 11).

Figura 11 – Porosidade em junta soldada em união de chapas



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A natureza e quantidade de poros no metal de solda dependem de processos relacionados ao tempo, que são: nucleação, crescimento, transporte e coalescência (colapso) dos poros. A energia necessária para formação de poros é determinada pelas tensões superficiais das interfaces sólido/líquido, gás/sólido e gás/líquido, além do grau de saturação dos gases no líquido (LEUNG et al., 2019). O aparecimento de porosidade passa por quatro estágios: a nucleação, a difusão, a solidificação e o aprisionamento/formação de poros. Os gases aprisionados podem ser tanto provenientes da supersaturação de gases dissolvidos, de reações químicas com liberação de gases ou ainda através do próprio gás de proteção.

A solidificação da junta soldada pode ocorrer por distintas causas, antes da deposição de metal de solda estar completa. De acordo com Maia e Trevisan (2007), a solubilidade dos elementos formadores de gases ser bem menor no metal sólido, o resfriamento e a consequente solidificação do metal de solda implicam rejeição desses elementos no metal líquido à frente da interface de solidificação levando à formação de bolhas de gás que podem vir a ser aprisionadas formando poros.

No caso do aço galvanizado, o aprisionamento desses gases é bastante problemático e o escape deve ser promovido a fim de reduzir os defeitos na porosidade (XIONG *et al.*, 2021). Nesse sentido, estudos têm sido realizados para promover essa diminuição de danos causados pelo aprisionamento de gases. Xiong *et al.* (2021), por exemplo, utilizaram soldagem em espiral a laser em aço galvanizado e verificaram que a porosidade tende a diminuir à medida que a velocidade empregada aumenta de  $3 \text{ m min}^{-1}$  para  $9 \text{ m min}^{-1}$ , sendo que a porosidade é praticamente suprimida na área de solda. Wu, Hu e Chen (2019) abordam que a fuga de vapores

de Zn através de folga de 1 mm entre as chapas de aço é capaz de reduzir efetivamente a porosidade da solda e, ao utilizar uma placa de revestimento de cobre abaixo das placas de aço, verifica-se aumento no número de poros na solda. Na pesquisa de Izutani, Yamazaki e Suzuki (2013) uma proposta denominada de “Solução-J”, prevê-se que a poça de fusão sob o arco possa ser mantida o mais fino possível para que o gás de Zn possa ser liberado ainda no estágio inicial, sendo possível reduzir o número de bolhas em até 80%.

Uma das causas fundamentais da formação de poros é a solubilidade muito menor em metal sólido que no metal líquido dos elementos formadores de gás. Uma menor taxa de solidificação do metal de solda permite maior difusão, e, conseqüentemente, menor concentração de gases à frente da interface de solidificação, o que permite ainda que bolhas de gases formadas tenham tempo suficiente para escaparem para a atmosfera antes de serem aprisionadas pelo sólido que está se formando. A taxa de solidificação na formação de poros por hidrogênio e sua redução, por exemplo, geram significativa queda no nível de porosidade (ZHANG *et al.*, 2018).

Outros pontos levantados em estudos acerca do aumento da porosidade em aço galvanizado estão ligados ao ângulo e posição. Yu e Kim (2018) analisaram as condições ótimas de ângulo da tocha e a posição de mira para solda de junta sobreposta em chapas de aço galvanizado e verificaram que a porosidade da solda pode ser reduzida ao otimizar esses parâmetros. A utilização de outras técnicas tem se mostrado efetiva para redução da porosidade em aço galvanizado, como descrito por Kam, Lee e Kim (2018), que utilizaram *gap-paste*, uma pasta que serve para criar lacunas para liberação de vapor de zinco, à base de partículas de titânio, onde conseguiram reduzir a porosidade de aproximadamente 15% para um valor próximo a zero, aplicando-se lacunas de 120  $\mu\text{m}$ . O arame de soldagem com determinada composição química também se mostra como fator determinante para a redução de porosidade, como demonstrado por Yu e Cho (2017), que ao testarem os efeitos do fio de solda de carbono (C), silício (Si) e manganês (Mn), verificaram que teores de Si (0,30%) e Mn (0,51%) podem reduzir a porosidade da solda. Ahsan *et al.* (2016) apontam que as condições de entrada de calor também influenciam na redução de porosidade, sendo verificado que abaixo de 250 J/mm e acima de 350 J/mm seria o essencial para haver menor quantidade de poros no aço galvanizado.

Devido às respostas encontradas nas pesquisas, especialmente nos últimos anos, e a fim de manter a qualidade da soldagem, estudos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de controlar de melhor forma o processo, evitando a ocorrência de defeitos. Por exemplo, Sumesh *et al.* (2018) descrevem o uso de algoritmo de árvore de decisão a fim de estabelecer uma correlação entre as assinaturas de corrente e tensão. Da mesma maneira, Thekkuden, Mourad e

Sherif (2020) apontam que modelos matemáticos são capazes de prever desvios normais e médios da tensão e da corrente em tempo real, o que permite detectar quais os melhores parâmetros a serem utilizados.

## **2.5 Técnicas de avaliação microestrutural de soldagem**

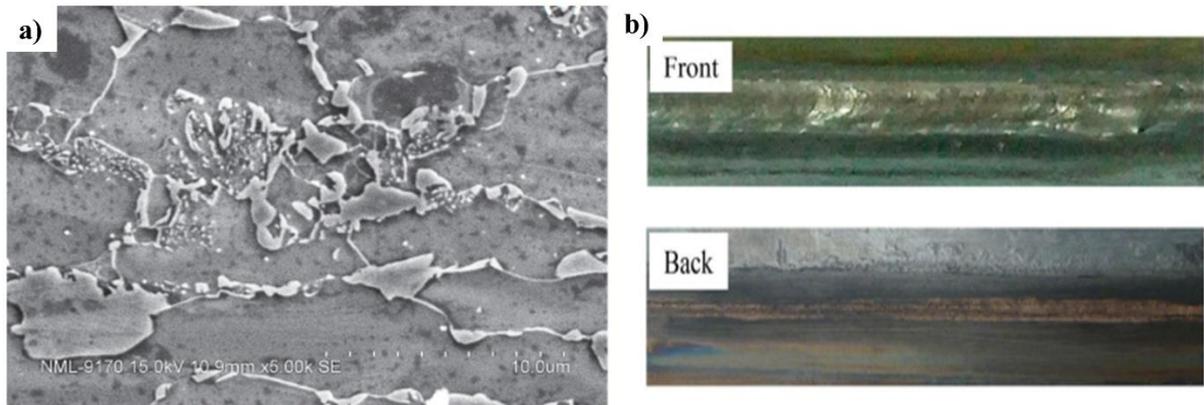
A avaliação da soldagem em aço galvanizado pode ocorrer com auxílio de ensaios destrutivos e não-destrutivos, gerando dados para análises quantitativa ou qualitativa. Dentre os ensaios destrutivos estão a inspeção por gravimetria, a análise de metalografia (micro ou macrografia) e o ensaio de tração. Dentre os ensaios não-destrutivos estão os métodos de avaliação de imagem por tomografia, raio-x, microscopia eletrônica de varredura e o ensaio de microdureza.

Dos ensaios destrutivos, a inspeção por gravimetria se baseia na quantificação volumétrica da porosidade. Esse método estima o percentual de vazios internos no cordão de solda por meio de comparações de valores de densidade do cordão de solda (MAIA, 2005). Como os defeitos gerados no processo GMAW são fatores importantes para determinar qualidade da solda, o tamanho dos poros costumeiramente é um indicador para aprovação da soldagem (SHIN; KIM; RHEE, 2019) e, segundo Souza e Quintao (2016), a resistência à fadiga é menor no caso da existência de poros superficiais do que no caso de poros internos.

A análise de metalografia consiste no conhecimento da morfologia e na estrutura dos metais, bem como permite correlacionar a estrutura e as propriedades. Através dessa técnica é possível realizar uma descrição qualitativa e quantitativa. Pela descrição qualitativa, descreve-se a área, os tipos dos grãos das interfaces e das linhas que aparecem nas imagens bidimensionais, por exemplo. Na descrição quantitativa, pode-se mensurar e quantificar metricamente e topologicamente os dados apresentados na descrição qualitativa, por meio de unidades de medidas, como para o tamanho da área e dos grãos, número de interseções de um recurso como uma linha e contagem de pontos (COLPAERT, 2018).

A metalografia pode ser dividida em micro e macrografia. Dessas, a micrografia é a mais comumente utilizada, e nessa utiliza-se um microscópio óptico, onde as amostras são iluminadas adequadamente com luz visível e a luz refletida chega ao observador. A resolução alcançada dependerá do comprimento de onda da radiação utilizada. Já a macrografia não necessita de microscopia, sendo realizado pela observação e mensuração das macroestruturas do material. Ambas as técnicas são consideradas precisas e confiáveis (COLPAERT, 2018) (Figura 12).

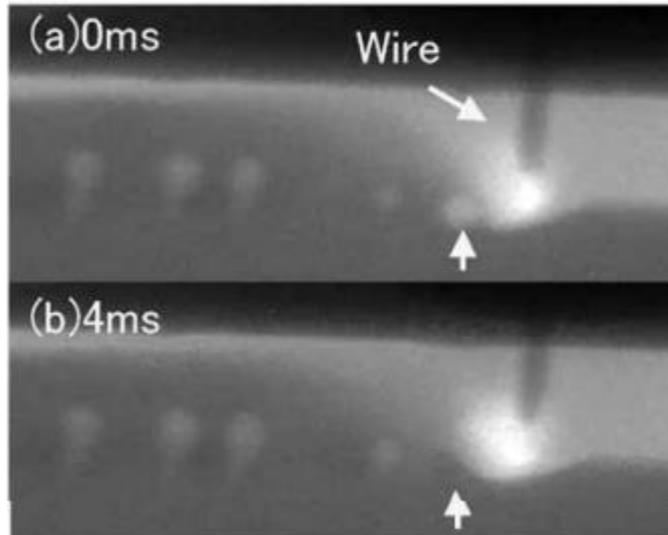
Figura 12 – Exemplo de micrografia (a) e macrografia (b) em aço galvanizado



Fonte: Jin *et al.*, 2016; Walunj *et al.*, 2021.

Entre os ensaios não-destrutivos, o método de ultrassonografia é utilizado a fim de emitir um feixe de ultrassom na estrutura que se pretende analisar. A partir dos ecos sonoros (ondas cinéticas), verifica-se as diferenças de densidades no material, o que pode indicar a existência de possíveis discontinuidades e inconsistências estruturais (POTTER *et al.*, 2006). A técnica radiográfica, por sua vez, permite determinar a localização, a distribuição e o tamanho dos vazios. Trata-se de um método que se baseia na utilização de raios-X e raios gama para revelar a presença de discontinuidades internas do material (TREVISAN; MAIA, 2007). Através da absorção da radiação na peça analisada, diferenças de densidade e variações de espessura dos materiais podem ser detectadas, visto que cada região da peça absorve a radiação com diferente intensidade. Essa variação na quantidade de radiação absorvida serve para indicar se existe ou não uma falha interna ou discontinuidade do material (IZUTANI; YAMAZAKI; SUZUKI, 2013; SHREYAS; PANDA; KUMAR, 2020), (Figura 13).

Figura 13 – Exemplo de radiografia em aço galvanizado



Fonte: Izutani, Yamazaki e Suzuki, 2013.

Por sua vez, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) consiste num microscópio com lentes eletromagnéticas e emissão de feixe de elétrons sobre a amostra analisada, que atua “varrendo” toda a superfície amostra, ao mesmo tempo que transmite o sinal dos detectores para um computador com ampliações na ordem de centenas de milhares de vezes, onde ocorre o detalhamento de imagens como contrastes, texturas e profundidade. Na análise de aço galvanizado, o MEV é importante, possibilitando determinar que a fratura na amostra soldada de aço galvanizado ocorre por propagação de trinca em região em que a camada de zinco não existe mais, mesmo sem a transformação da austenita em martensita (MAZZAFERRO, 2008).

Alinhado ao MEV, a caracterização química da microestrutura em cada ponto se dá pelo mapa de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), o detector de energia dispersiva por raios X, cujo benefício é mapear e caracterizar a composição química em cada fase. Na análise de juntas de aço galvanizado soldado é de extrema importante esse recurso, pois aponta como a camada de Zn se dissipou e depositou após a vaporização durante a soldagem.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Planejamento experimental

Nesse trabalho analisou-se o comportamento da microestrutura de juntas soldadas em metal base (aço galvanizado) sob a influência de distintos metais de adição (arame sólido e arames tubulares) e gases de proteção – variáveis independentes.

Combinando as variáveis independentes, os experimentos foram divididos em: três níveis para o tipo de metal de adição, três níveis para o gás de proteção, totalizando 7 condições de soldagem estabelecidas (Tabela 1). Para cada condição foram adotadas três réplicas, ou seja, soldados três corpos de prova, totalizando 21 corpos de prova a serem avaliados.

Em relação ao metal de adição, estabeleceu-se o uso de arame sólido para aços galvanizados, o arame tubular com proteção gasosa e o arame tubular sem proteção gasosa autoprotégido. Os gases de proteção foram utilizados em diferentes combinações, sendo elas: 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>; 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>; 95% Ar + 5% O<sub>2</sub>. A escolha por essas combinações respeita a abrangência e ficha técnica dos metais de adição, bem como consiste em combinações de misturas de gás respaldados pela literatura (ARIVAZHAGAN e KAMARAJ 2013; BABKIN e GLADKOV, 2016; BARBEDO, 2011; GROETELAARS, 2005) e de boa disponibilidade no mercado. Como uma das escolhas de metal de adição (arame tubular autoprotégido) dispensa o gás de proteção da tocha, nesta condição não foi utilizada mistura de gás adicional com intuito de avaliar eficácia deste na estabilização do arco e da camada de zinco na poça de fusão. Ademais, as combinações são as mais comumente utilizadas e seguem protocolos já estabelecidos pela empresa Comil Ônibus em que os processos são implementados e avaliados.

Tabela 1 – Planejamento Experimental

<b>Metal de adição</b>	<b>Mistura</b>	<b>Condição</b>	<b>Amostras</b>
Arame sólido para aços galvanizados	92% Ar + 8% CO <sub>2</sub>	1	1,2,3
	80% Ar + 20% CO <sub>2</sub>	2	4,5,6
	95% Ar + 5% O <sub>2</sub>	3	7,8,9
Arame tubular com proteção gasosa	92% Ar + 8% CO <sub>2</sub>	4	10,11,12
	80% Ar + 20% CO <sub>2</sub>	5	13,14,15
	95% Ar + 5% O <sub>2</sub>	6	16,17,18
Arame tubular sem proteção gasosa autoprotégido	N/A	7	19,20,21

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para eliminar o comprometimento dos resultados, adotou-se padrões pré-estabelecidos, sendo a posição de solda plana, com um passe de solda e tensão, corrente e vazão de gás

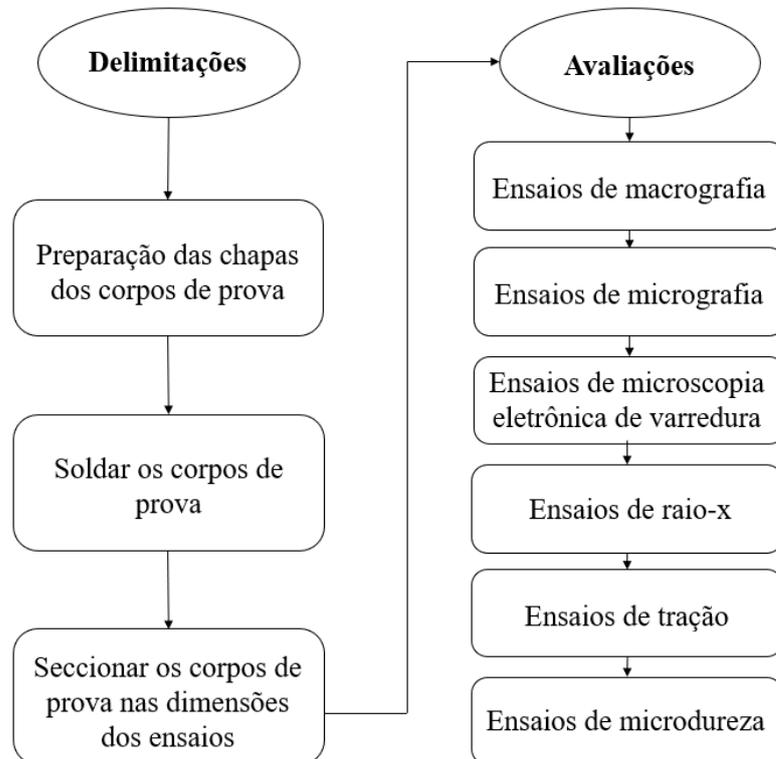
conforme a Tabela 2. Estes dados são apoiados pela EPS e ficha de especificação de materiais presentes nos Anexos A e B, respectivamente.

Tabela 2 – Parâmetros de solda do procedimento experimental

<b>Arame</b>	<b>Mistura (%)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Vazão gás (L/min)</b>
Sólido (ER70S-G) - ESAB	92 Ar + 8 CO <sub>2</sub>	17,5	170	13
Sólido (ER70S-G) - ESAB	80 Ar + 20 CO <sub>2</sub>	17,5	170	13
Sólido (ER70S-G) - ESAB	95 Ar + 5 O <sub>2</sub>	17,5	170	13
Tubular com proteção gasosa (E71T-11) - Lincoln Megacore	92 Ar + 8 CO <sub>2</sub>	22	204	13
Tubular com proteção gasosa (E71T-11) - Lincoln Megacore	80 Ar + 20 CO <sub>2</sub>	22	204	13
Tubular com proteção gasosa (E71T-11) - Lincoln Megacore	95 Ar + 5O <sub>2</sub>	22	204	13
Tubular sem proteção gasosa autoprotégido FCAW-S (E71T-1M) - Lincoln Innershield	N/A	19,5	185	N/A

A partir de cada corpo de prova foram retiradas amostras para o ensaio de tração, para o ensaio de micrografia e macrografia, bem como para tomografia. Na Figura 14 apresenta-se o fluxograma do experimento realizado.

Figura 14 – Fluxograma da execução dos experimentos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

### 3.2 Especificações dos materiais

O metal base para os experimentos manteve-se o mesmo para duas peças da junta soldada. Esse consiste no aço carbono galvanizado na espessura de 2,70 mm. Essa espessura foi escolhida, pois é a de maior aplicabilidade no processo produtivo da estrutura da carroceria de ônibus na indústria avaliada. De acordo com a NBR 7008 esse aço é classificado como ZAR230 possui as características de composição e propriedades mecânicas da Tabela 3 e sua camada protetiva é obtida através do processo de imersão a quente.

Os metais de adição utilizados (arame sólido para solda de aço galvanizado, arame tubular sem proteção gasosa autoprottegido e arame tubular com proteção gasosa) foram escolhidos através de pesquisa da literatura e do estado da arte como sendo os de maior aplicabilidade para estabilização da poça de fusão, como descrito no tópico “2.3 Arame Tubular” da revisão bibliográfica.

O arame sólido para solda de aço galvanizado possui enriquecimento de Mn e Si, que corrobora os estudos da influência desses elementos. Esse arame possui diâmetro de 1,00 mm e tem sua classificação segundo a AWS A5.18 como ER70S-G, é da fabricante ESAB, nome comercial OK AristoRod 38Zn. O arame tubular sem proteção gasosa autoprottegido, também

conhecido como FCAW-S, possui diâmetro 1,10 mm e tem sua classificação segundo a AWS A5.20 como E71T-11, é da fabricante Lincoln Electric, nome comercial Innershield NR211-MP. E, por fim, o arame tubular com proteção gasosa é do tipo básico-rutílico, possui diâmetro 1,20 mm e tem sua classificação segundo a AWS A5.20 como E71T-1M, é da fabricante Lincoln Electric, nome comercial Megacore 71 DG (Tabela 4 e 5).

Tabela 3 – Composição Química e Propriedades Mecânicas do aço ZAR230

Composição Química (%)			Propriedades Mecânicas		
C	P (max)	S (max)	LE (min) (MPa)	LR (min) (MPa)	Alongamento (min) (%)
0,20	0,04	0,04	230	310	22

Fonte: ABNT, 2003.

Tabela 4 – Composição química dos metais de adição

Arame	Classe (AWS A5.20)	Diâmetro (mm)	C	Mn	Si
Arame sólido	ER70S-G	1	0,07	1,4	0,8
Arame tubular sem proteção gasosa	E71T-11	1,1	0,31	1,75	0,6
Arame tubular com proteção gasosa	E71T-1M	1,2	0,12	1,75	0,9

Fonte: AWS, 1995.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos metais de adição

Arame	Corrente (A)	Tensão (V)	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento (min) (%)
Arame sólido	100 - 300	16,5 - 34,5	450	550	30
Arame tubular sem proteção gasosa	120 - 170	15 - 19	400	480 - 655	20
Arame tubular com proteção gasosa	115 - 230	21,5 - 26	390	490 - 670	22

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A comparação entre as propriedades dos arames permite estabelecer que todos eles possuem características mecânicas (limite escoamento, resistência a tração e alongamento) iguais ou superiores ao metal base, sendo um pré-requisito para o processo de soldagem, tendo em vista que o arame utilizado precisa ser mais resistente que o metal base. Além disso, dentre suas composições, os elementos de maior influência e variação são carbono, manganês e silício. Para execução dos experimentos foram respeitadas as faixas dos parâmetros de corrente e tensão elétrica sugerido pelos fabricantes para cada tipo de arame.

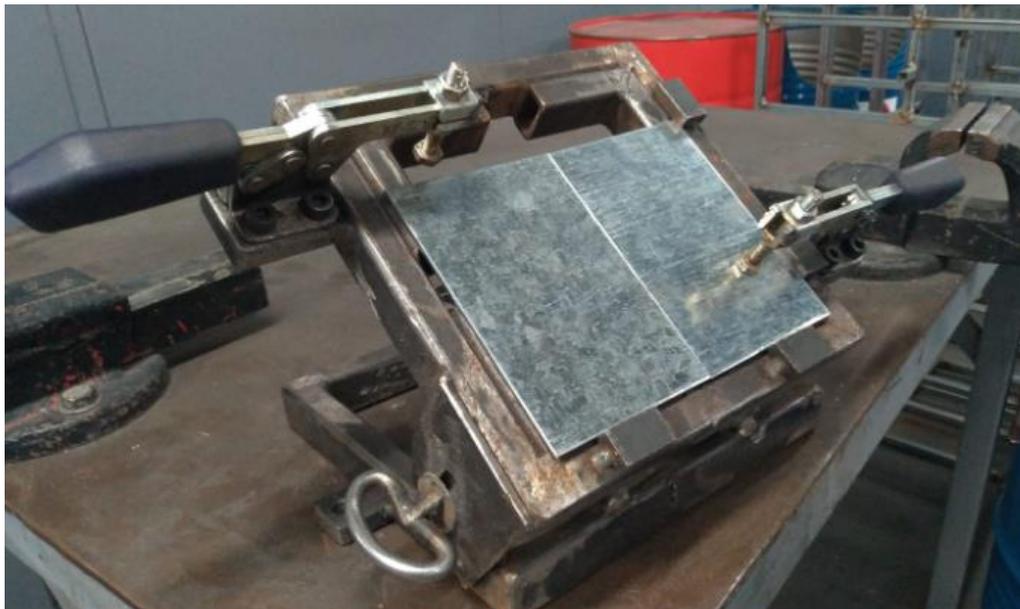
Para a realização dos ensaios de soldagem GMAW, utilizou-se uma fonte de solda trifásica convencional eletrônica com alimentador de arame da marca ESAB, modelo Smashweld318, com faixa de corrente de 50 a 420 A de tensão de 17 a 35 V, sendo carga a

fator de 100% de 220 A/25 V. Para utilização dos arames tubulares nessa fonte de soldagem foi instalada roldanas recartilhadas de 1,2 e 1,6 mm.

### 3.3 Preparação dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram preparados, seguindo-se a seção E8.M da norma ASTM. As juntas soldadas constituíram-se de duas chapas na dimensão de 100 x 150 mm (e espessura de 2,70 mm). Essas chapas foram cortadas em processo mecânico a frio em máquina guilhotina. As chapas (A e B) de cada experimento foram preparadas unindo suas faces de 150 mm, sendo realizado por meio de cordão de solda, conforme indica a Figura 15. Essas chapas são posicionadas e presas sobre estrutura gabarito desenvolvida, inclinada em ângulo de 45° em relação a bancada de soldagem.

Figura 15 – Corpos de prova posicionado na estrutura do gabarito

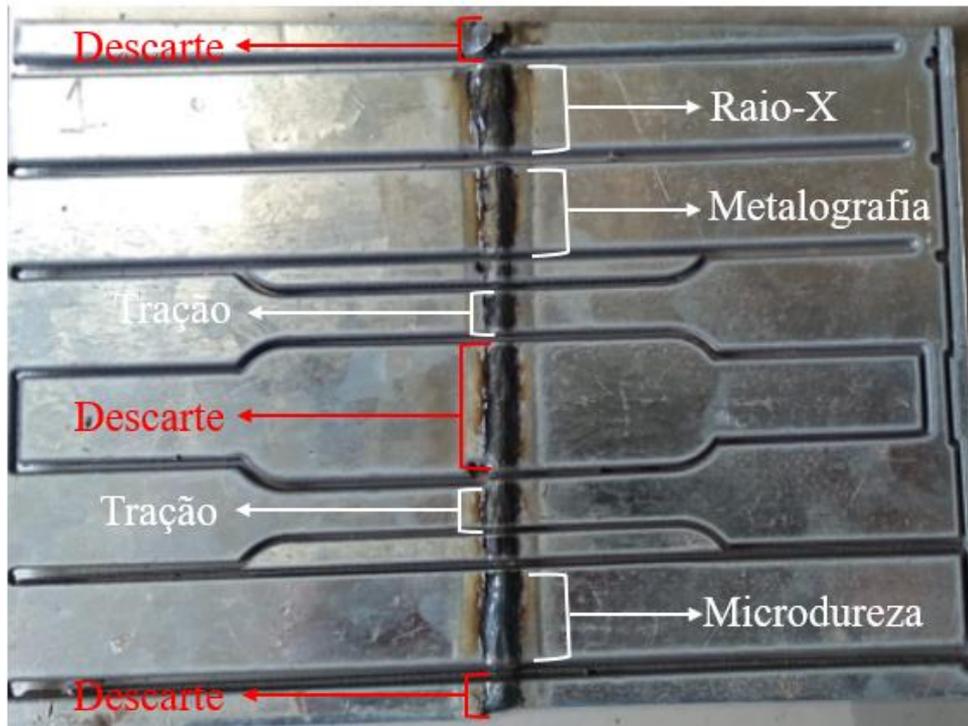


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Após a realização da soldagem, para os arames tubulares foi removida a camada de escória superficial. Para a realização dos ensaios posteriores, seguiu-se a norma AWS A5.20-95 em sua recomendação de retirada das amostras, desprezando-se 25,4 mm de comprimento de cordão no início e no final de cada cordão de solda. Desta forma, cada corpo de prova possui seção útil de cordão de solda de 100 mm de comprimento da junta soldada. O seccionamento dos corpos de prova ocorreu com auxílio de serra fita horizontal e corte com jato de água para

evitar aquecimento e mudança da estrutura cristalina da junta soldada. Estes cortes permitiram o seccionamento das amostras para uso em cada técnica de avaliação conforme a Figura 16.

Figura 16 – Seccionamento de amostras para cada ensaio em um corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

### 3.4 Técnicas de caracterização

#### 3.4.1 Microscopia ótica e varredura

Para cada corpo de prova foi retirada amostra de 20 mm da seção do cordão para realização desse ensaio, sendo as amostras embutidas com resina e preparadas metalograficamente, seguindo sequência de lixamento com lixas de granulometria 220, 400, 600 e 1200, consecutivamente. Já preparadas, as amostras passaram por ataque químico de nital 10% para macrografia e 5% para micrografia. A medição nesse ensaio foi realizada com microscópio ótico de inspeção estéreomicroscópio Zeiss Stemi, modelo 2000-C para macrografia e microscópio Zeiss Axio, modelo Scope.A1 para micrografia.

A caracterização das microestruturas nas diferentes zonas das juntas foi realizada em microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca Tescan, modelo Veja 3LM, sendo o ensaio conduzido sem ataque químico.

### **3.4.2 Ensaio de microdureza**

Foram realizados perfis de microdureza com objetivo de avaliar a dureza na região soldada. As identações foram feitas em um microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-G 20ST, usando carga de 0,2 kgf e com identações realizadas em três seções de cada condição: metal base (MB), metal fundido ou de adição (MA) e zona afetada pelo calor (ZAC).

### **3.4.3 Raio X**

Para avaliação das regiões soldadas com raio X as amostras foram submetidas a raios do tipo Gama com tempo de exposição de seis minutos em fonte de IR-192, aplicadas sobre uma mesma lâmina todas as amostras, de dimensão 20x40mm.

### **3.4.4 Ensaio de tração**

As propriedades mecânicas das soldas obtidas foram determinadas através de ensaios de tração, de acordo com a norma ASTM E8.M, sendo que em cada corpo de prova foi retirado da faixa útil do cordão de solda uma amostra (Figura 16). Os corpos de prova foram tracionados na máquina de fabricante Schenck, modelo UPM-200.

## 4. RESULTADOS

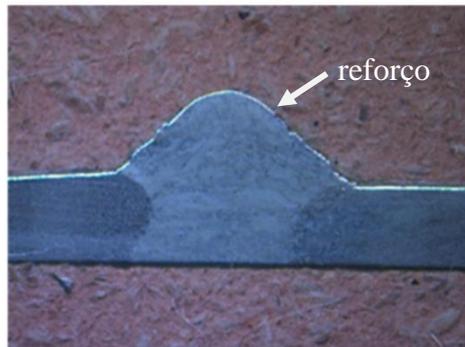
### 4.1 Macrografia

Nas macrografias foi possível identificar a clara separação da região do metal base (MB) aço galvanizado e da região fundida com metal de adição (MA), sendo que a Figura 17 mostra as macroestruturas das juntas soldadas, com um detalhamento em uma amostra de cada uma das 7 condições avaliadas.

A soldagem com arame sólido apresentou variações conforme a mistura de gás de proteção foi sendo alterado. Se na proporção de argônio e dióxido de carbono 92%/8% a solda foi mais uniforme e com boa penetração, mas apresentou excesso de reforço no cordão, considerando-se assim a melhor das condições para esse arame (Figura 17a). Na combinação com argônio 80% e dióxido carbono 20% a penetração é boa, mas são observados defeitos na base gerados pela estabilidade do arco elétrico (Figura 17b). Ao inserir oxigênio na taxa de 5% mais argônio (95%) há clara deposição e reforço de cordão, com igualmente boa penetração (Figura 17c). Nestas condições com arame sólido, percebe-se que o arame possui uma adequada taxa de deposição para o material base usado e o fator gás de proteção tem pequena contribuição na qualidade final. Sendo assim, a combinação 92Ar+8%CO<sub>2</sub> é a de melhor qualidade na análise de macrografia (Figura 17a).

Quando utilizados arames tubulares, há maior variação entre a qualidade das soldas. No arame tubular com proteção gasosa em todas as combinações de gases de proteção temos solda de cordões mais largos (Figura 17d, 17e, 17f, 17g), se comparado com arame sólido, indicando energia de soldagem ou aporte térmico maior. Nas combinações de gases argônio e dióxido de carbono (92%/8%; 80%/20%) a solda revelou-se homogênea e de boa penetração (Figuras 17d, 17e), mas quando usado oxigênio (95%Ar/5%O<sub>2</sub>) há sobreposição de material na raiz (Figura 17f), fator esse que pode gerar concentrador de tensão. Já no uso do arame tubular autoprottegido de fluxo FCAW-S há falta de fusão combinado com excesso de reforço de cordão (Figura 17g).

Figura 17 – Macroestruturas das juntas soldadas para cada condição avaliada



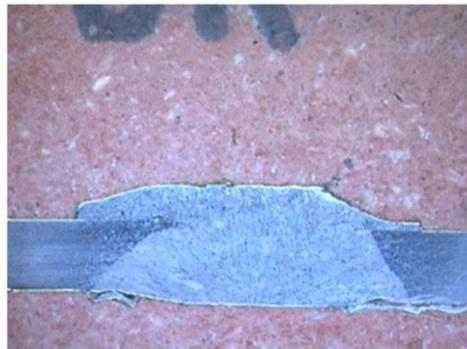
a) Arame Sólido (ER70S-G), gás 92%Ar/8%CO<sup>2</sup> - condição 01



b) Arame Sólido (ER70S-G), gás 80%Ar/20%CO<sup>2</sup> - condição 04



c) Arame Sólido (ER70S-G), gás 95%Ar/5%O<sup>2</sup> - condição 07



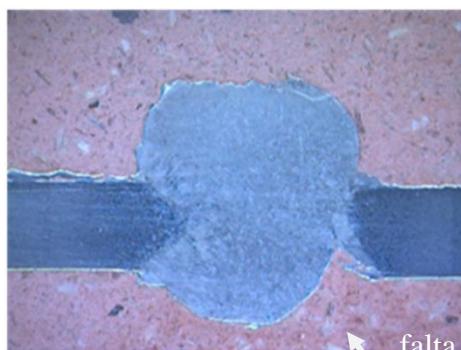
d) arame tubular com proteção gasosa (E71T-11), gás 92%Ar/8%CO<sup>2</sup> - condição 10



e) arame tubular com proteção gasosa (E71T-11), gás 80%Ar/20%CO<sup>2</sup> - condição 13



f) arame tubular com proteção gasosa (E71T-11), gás 95%Ar/5%O<sup>2</sup> - condição 16



g) arame tubular sem proteção gasosa autoprotégido FCAW-S (E71T-1M), sem gás de proteção adicional – condição 19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

## 4.2 Micrografia

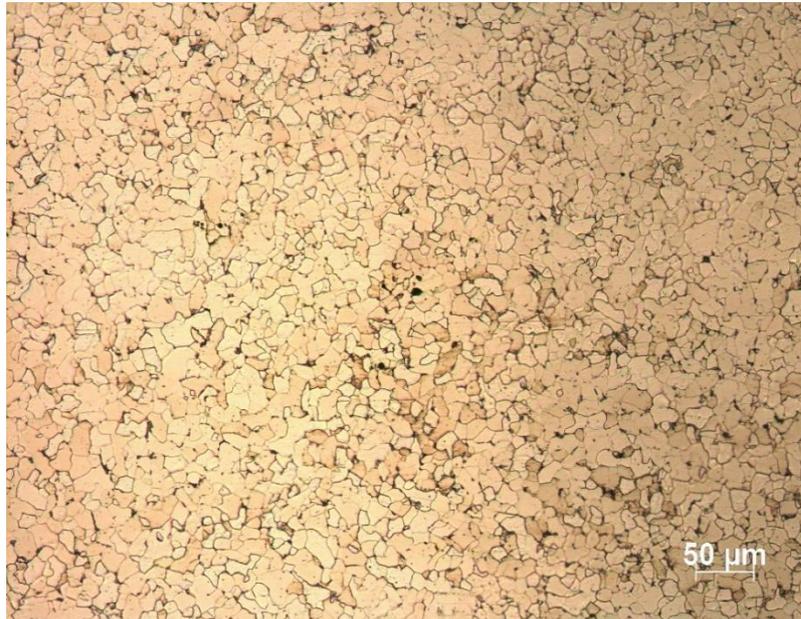
Na análise das imagens reveladas pela técnica de micrografia, três regiões são distintas entre si na sua composição e organização microestrutural: a região de metal base (MB), região do metal fundido ou metal de adição (MA) e a região da zona afetada pelo calor (ZAC) ou termicamente afetada. Sob análise da microestrutura, o metal base não teve variação em nenhum dos experimentos realizados e, como mostra na Figura 18 e 19 a microestrutura é homogênea de ferrita na fase poligonal de grãos apresentando tamanho constante em todas as regiões.

Figura 18 – Micrografia do metal base (aço galvanizado ZAR230) – ampliação 100x



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 19 – Micrografia do metal base (aço galvanizado ZAR230) – ampliação 200x

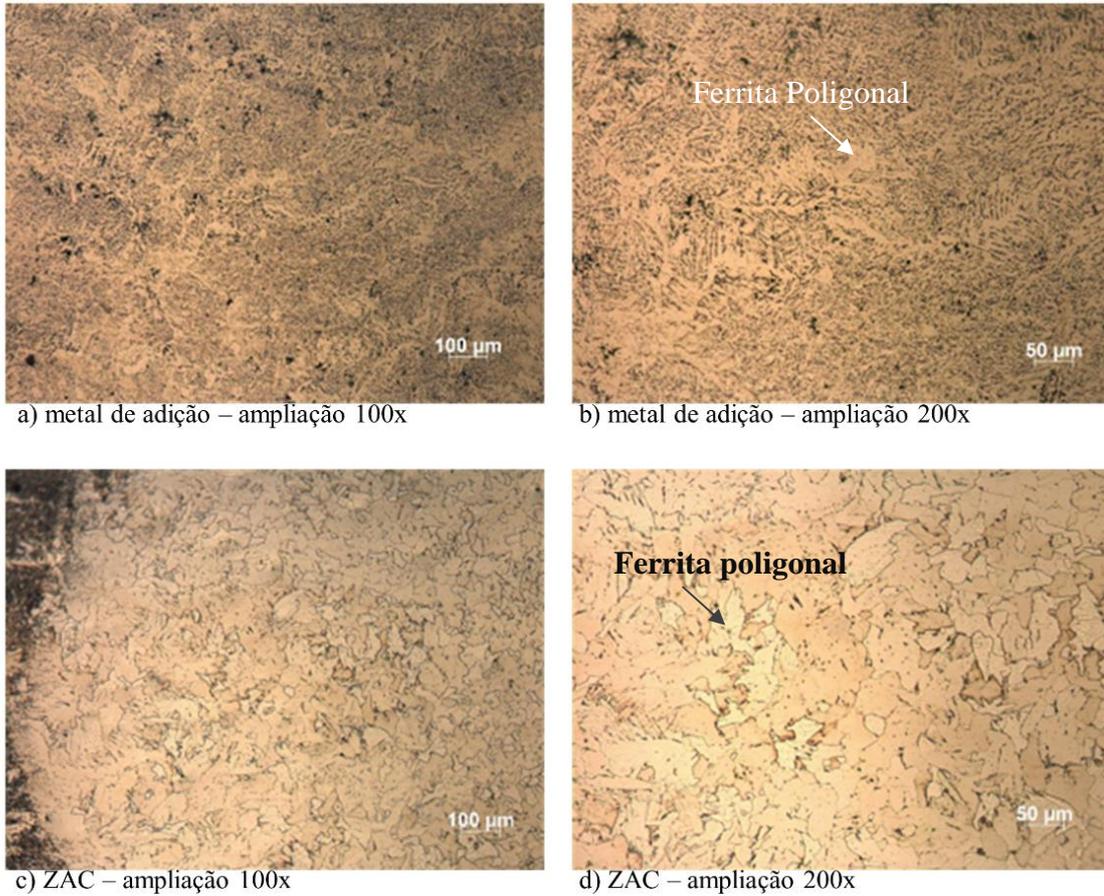


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No entanto, as variações nas regiões ZAC e MA são mais pronunciadas para cada condição avaliada. Ao analisar a condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 92% Ar/8% CO<sub>2</sub> na região de metal de adição (Figura 20), constata-se que há presença de ferrita, podendo ser classificada segundo Thewlis (2004) como ferrita acicular (AF) e ferrita poligonal (PF).

Na ZAC a microestrutura caracteriza-se pela presença exclusivamente de ferrita poligonal com grão com crescimento após recristalização (Figura 20d).

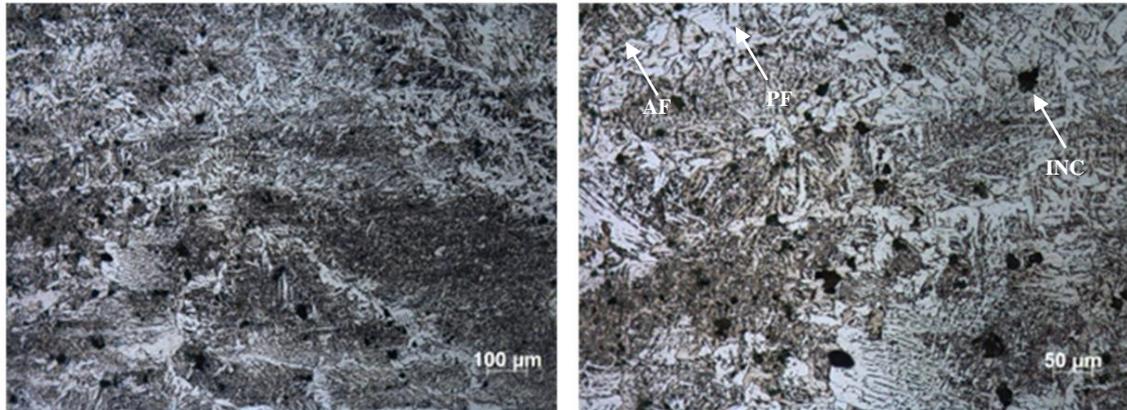
Figura 20 – Micrografia da junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 92%Ar/8%CO<sub>2</sub> – amostra 01



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

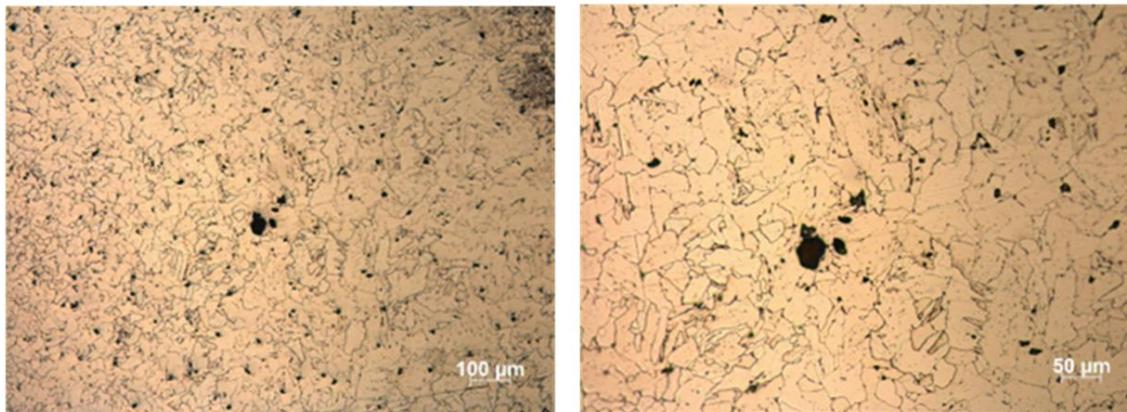
Mantendo-se o arame sólido e apenas alterando a proporção da mistura para 80%Ar/20%CO<sub>2</sub>, a microestrutura do material fundido (MA) já apresenta maior concentração de ferrita do tipo acicular (AF) e de inclusões do metal de solda, além de manter presença de ferrita poligonal (PF) (Figura 21). A ZAC apresenta crescimento de grão da recristalização caracterizado como ferrita poligonal.

Figura 21 – Micrografia da junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 80%Ar/20%CO<sub>2</sub> amostra 04



a) metal de adição – ampliação 100x

b) metal de adição – ampliação 200x



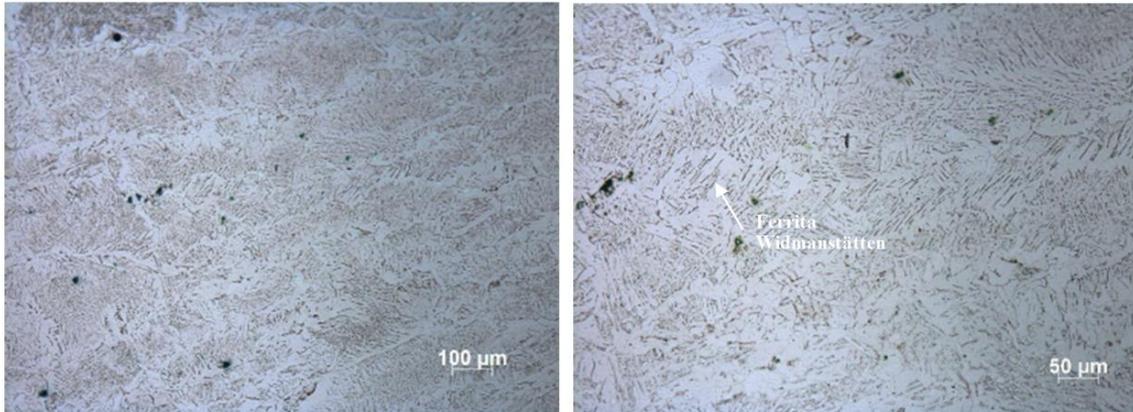
c) ZAC – ampliação 100x

d) ZAC – ampliação 200x

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

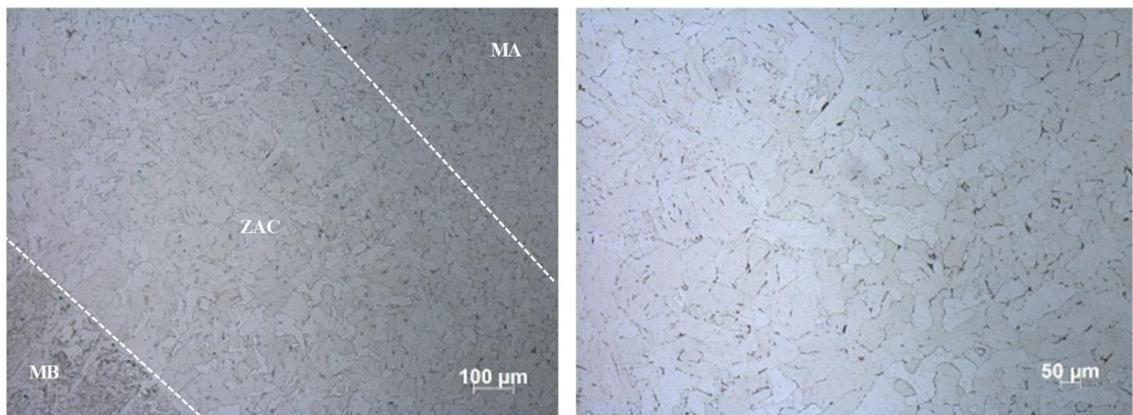
Na última condição, utilizou-se arame sólido, onde há a troca da mistura para adição de 5% de O<sub>2</sub> com 95% de Ar. Constata-se na análise de microestrutura que há a caracterização de novo tipo de ferrita, a de Widmanstätten (Figura 22). Além desta, estão presentes inclusões do arame de solda e ferrita acicular e poligonal. A zona afetada pelo calor segue padrão das condições previamente analisadas com aumento de grão e caracterização de ferrita poligonal. É possível perceber na Figura 22c a clara distinção entre as 3 zonas de estudo da microestrutura em que tamanhos de grão são variáveis, sendo maiores na ZAC e menores no metal base.

Figura 22 – Micrografia da junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 95%Ar/5%O<sub>2</sub> - amostra 07



a) metal de adição – Ampliação 100x

b) metal de adição – ampliação 200x



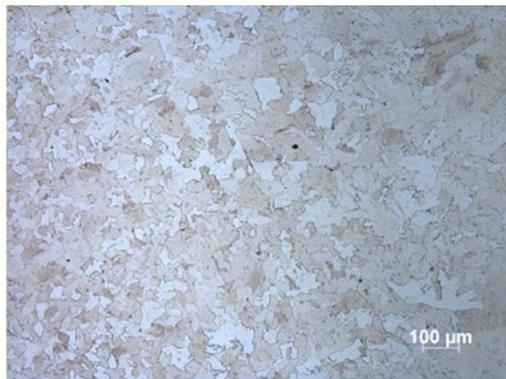
c) ZAC – ampliação 100x

d) ZAC – ampliação 200x

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao utilizar arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 92%Ar/8%CO<sub>2</sub>, a microestrutura é caracterizada com ferrita acicular e poligonal (Figura 23). Além disso, são encontradas descontinuidades do tipo porosidade na região periférica do metal fundido acompanhando o contorno da face da junta soldada. No entanto, na ZAC, essas descontinuidades não estão presentes e há somente crescimento de grão da recristalização na região central, caracterizado como ferrita poligonal.

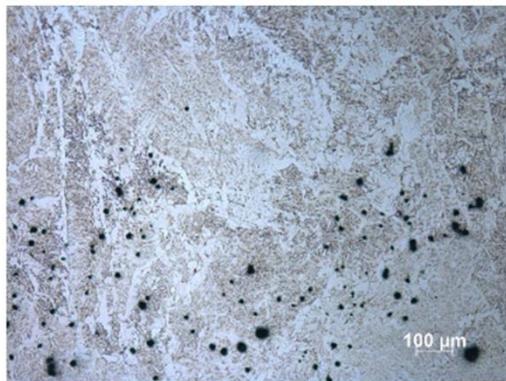
Figura 23 – Micrografia da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 92%Ar/8%CO<sub>2</sub> - amostra 10



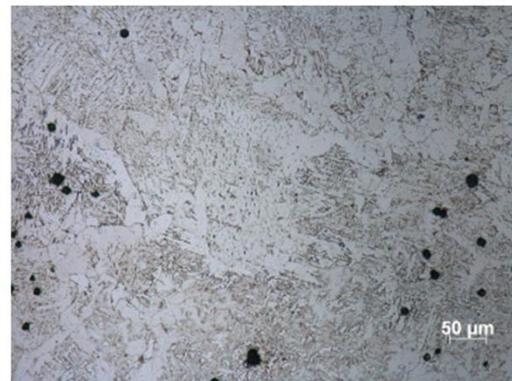
a) metal de adição – ampliação 100x



b) metal de adição – ampliação 200x



c) ZAC – ampliação 100x

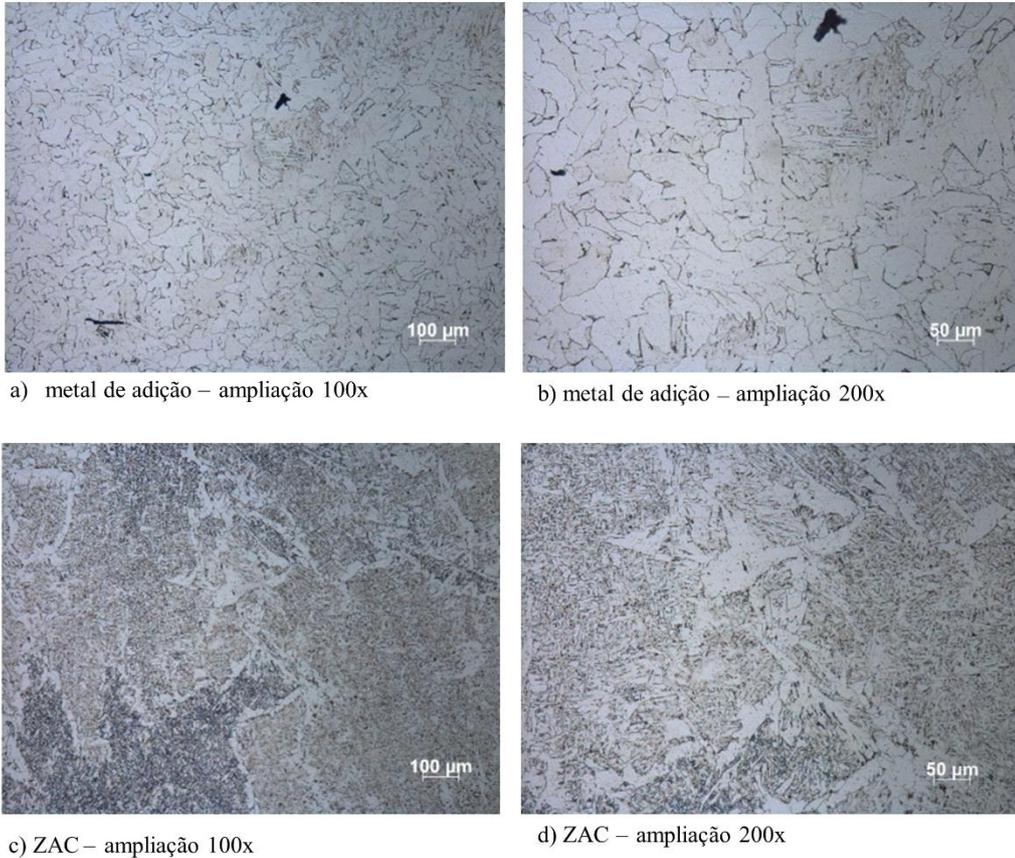


d) ZAC – ampliação 200x

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com a utilização de mistura 80%Ar/20%CO<sub>2</sub> e arame tubular com proteção gasosa mantem-se a caracterização de ferrita acicular e poligonal na zona de metal de adição em fases bem distintas e agrupadas (Figura 24a, 24b) e a ZAC possui crescimento de grão da recristalização caracterizado como ferrita poligonal (Figura 24c, 24d).

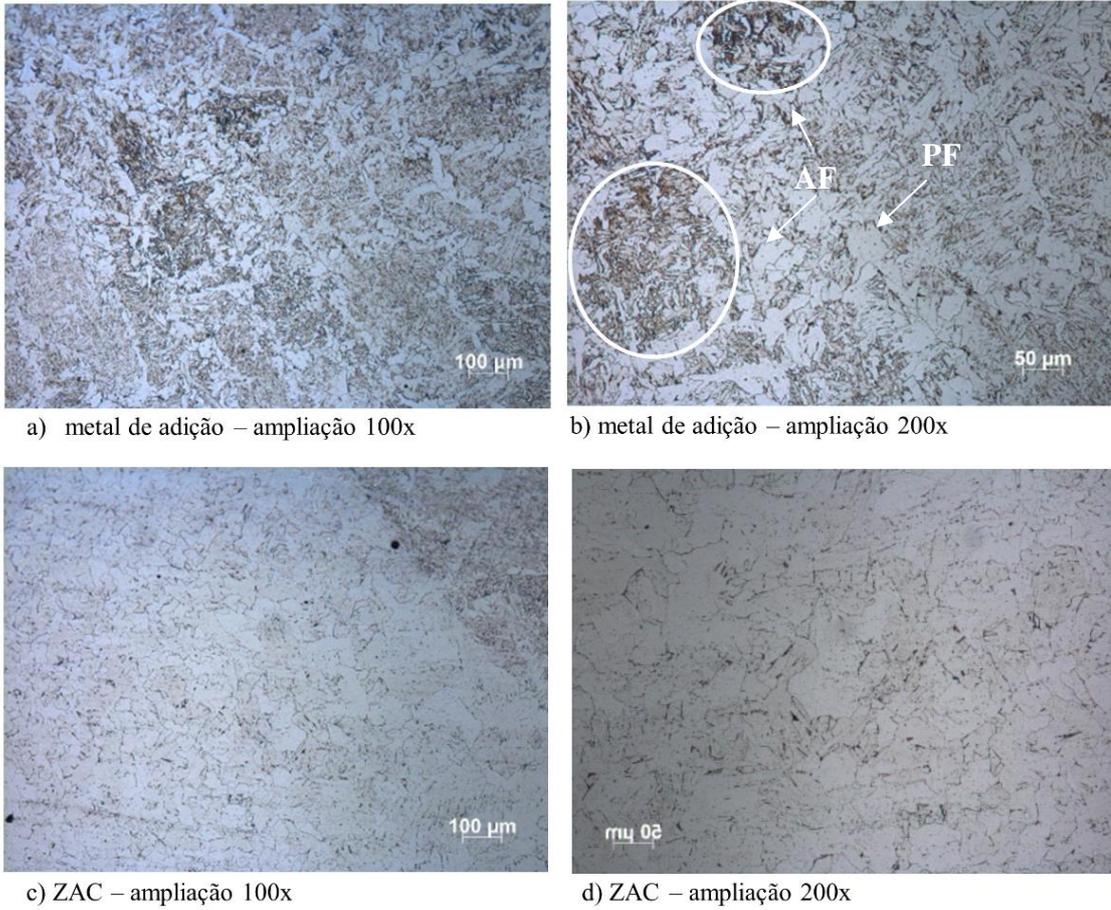
Figura 24 – Micrografia da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) mistura 80%Ar/20%CO<sub>2</sub> - amostra 13



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para o uso de arame tubular com proteção gasosa e com mistura na combinação 95%Ar/5%O<sub>2</sub>, a microestrutura consiste em ferrita poligonal e acicular (Figura 25b), essa última em regiões agrupadas. Na ZAC, a ferrita é somente do tipo poligonal com aumento de grão (Figura 25c, 25d).

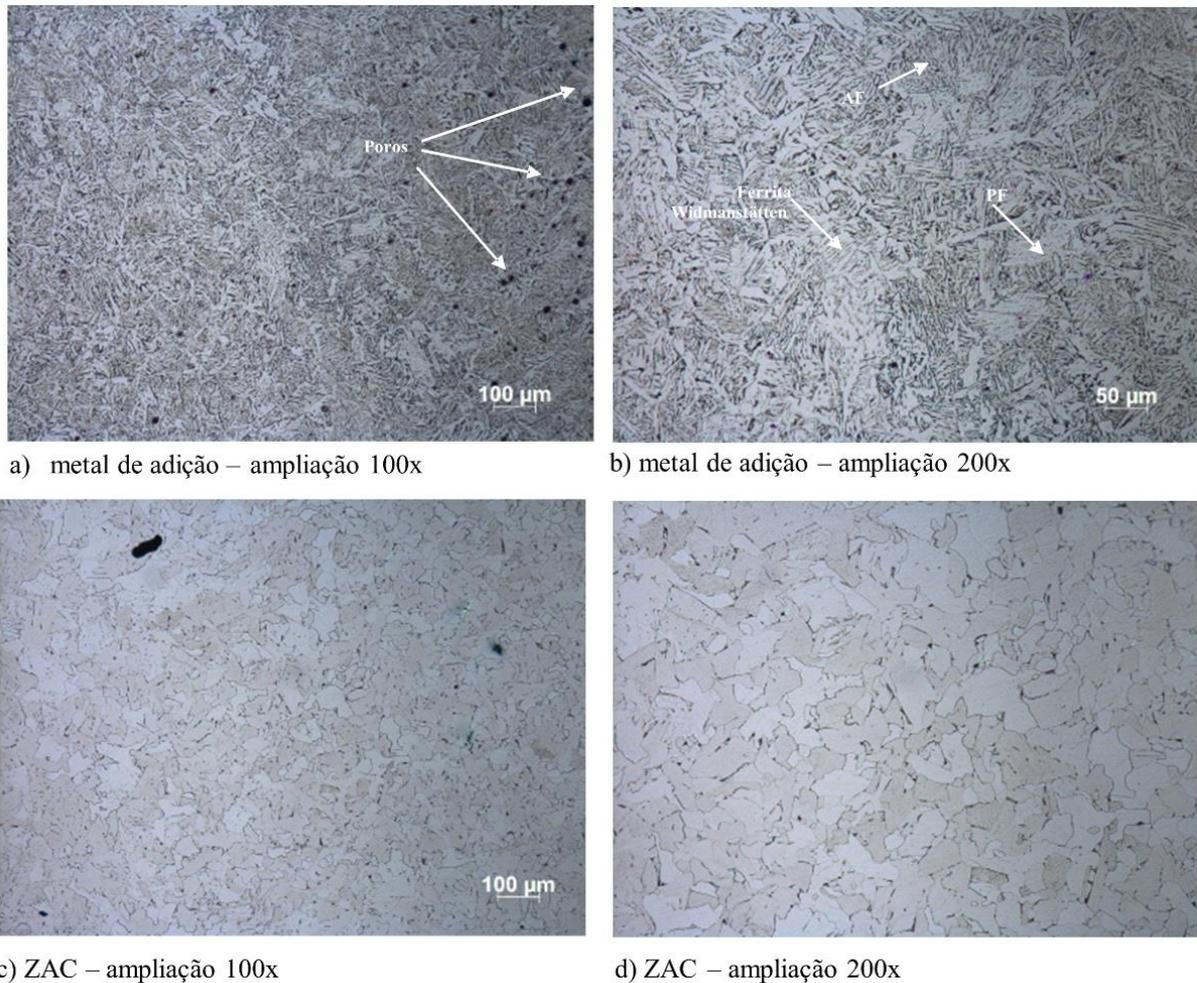
Figura 25 – Micrografia da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 95%Ar/5%O<sub>2</sub> amostra 16



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A utilização de arame tubular autoprottegido, que dispensa a adição de gás de proteção, apresenta a microestrutura na região de metal de adição fundido com presença de poros na sua periferia (Figura 26a), sendo que esses não são encontrados na ZAC. A estrutura tem na sua categorização a presença de ferrita acicular, poligonal e de Widmanstätten (Figura 26b) e uma ZAC com crescimento de grão da recristalização e caracterização de ferrita poligonal (Figura 26c, 26d).

Figura 26 – Micrografia da junta soldada na condição de arame tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M) - amostra 19



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O comportamento da microestrutura observado nas zonas afetadas pelo calor (ZAC) não demonstra diferenças entre as condições avaliadas. Porém, a caracterização de ferrita poligonal com crescimento de grão da recristalização e não homogêneos pode ter impacto sobre as propriedades mecânicas, em especial na redução da tenacidade e na propagação de falhas.

Em todas as condições foi possível avaliar e categorizar apenas fases de ferrita, porém nas micrografias foi possível identificar a porosidade em duas condições, ambas com uso de arame tubular (condições 10 e 19). Através do uso do software *ImageJ* foi possível quantificar o percentual de poros na área de metal de adição. Enquanto a amostra 10 tem aplicação do amostra 19 utiliza o arame autoprottegido e apresentou porosidade de 0,62% da área (Figura 27 e 28).

Figura 27 – Porosidade na região de metal adição fundido com arame tubular com proteção gasosa e mistura 92%Ar/8% CO<sub>2</sub> - amostra 10



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 28 – Porosidade na região de metal adição fundido com arame autoprottegido - amostra 19



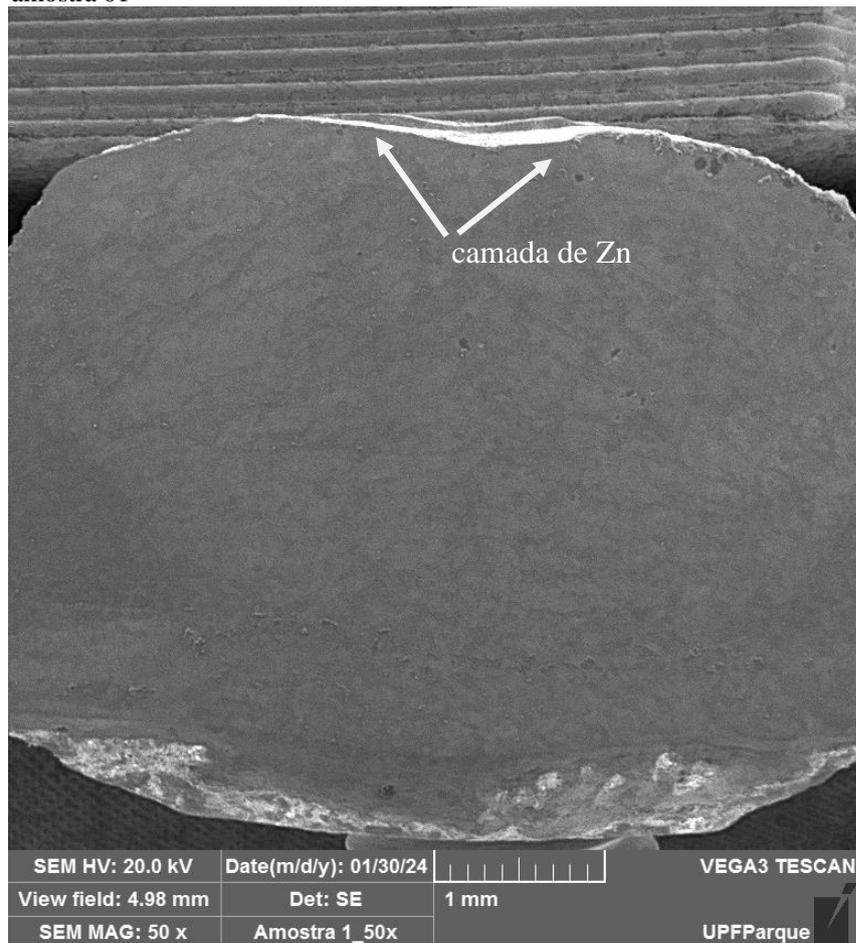
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

### 4.3 Microscopia de varredura (MEV)

As análises de microscopia ótica de varredura trouxeram importantes resultados a pesquisa. Primeiramente, a visualização da região soldada foi realizada com ampliações de 30, 50, 200, 700, 1000 e 5000 vezes e trouxe em observação inicial que a região da camada protetiva de zinco do metal base se mantém de forma contínua, não tendo distinção significativa entre as condições estudadas.

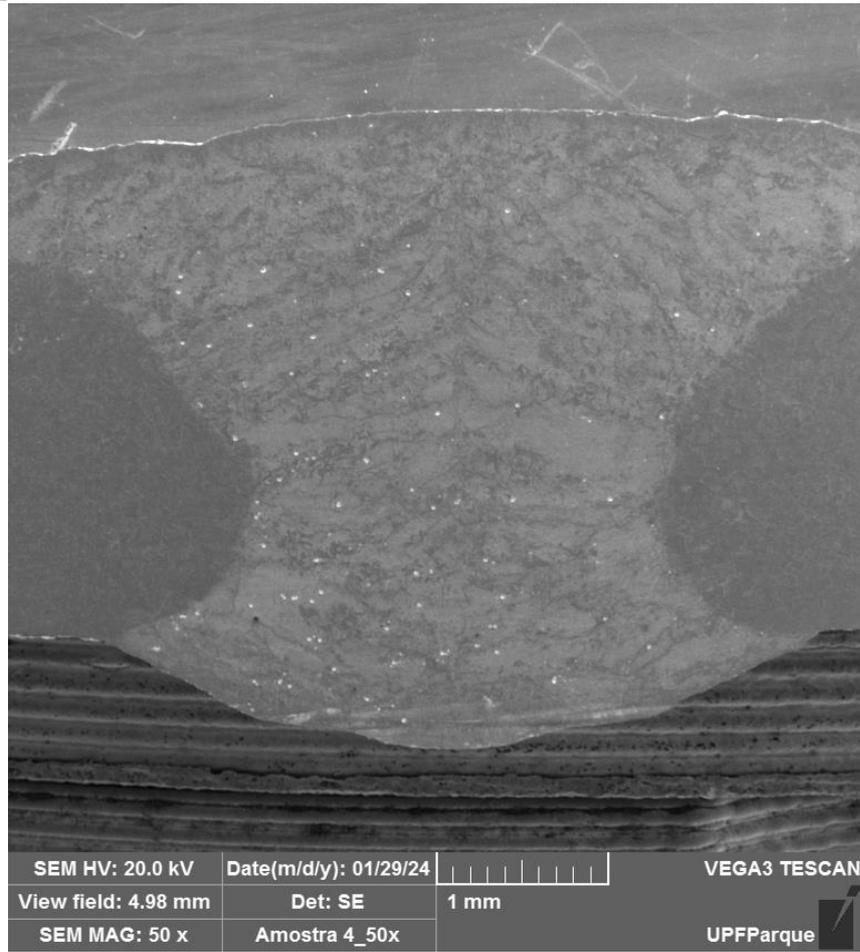
No entanto, a maior contribuição desta microscopia foi avaliar a incidência de porosidade na região de metal de adição, ocorrendo em diversos graus em cada condição. Quando a condição corresponde ao uso de arame sólido, representado pelas Figuras 29, 30 e 31, há incidência de poros diminutos na área central do metal de adição, sobressaindo-se a sua concentração nas condições de mistura de gás 80%Ar/20%CO<sub>2</sub> e 95%Ar/5%O<sub>2</sub>.

Figura 29 – Microscopia ótica de varredura para junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 92% Ar/8%CO<sub>2</sub> - amostra 01



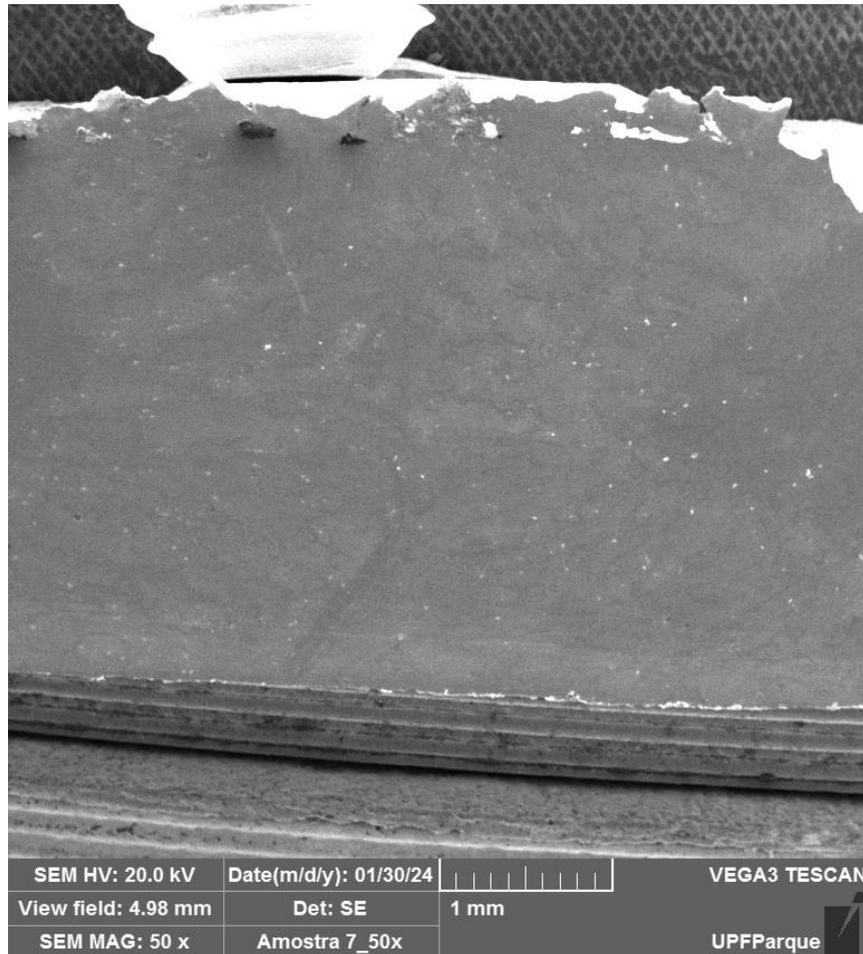
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 30 - Microscopia ótica de varredura para junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) e mistura 80%Ar/20%CO<sub>2</sub> - amostra 04



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

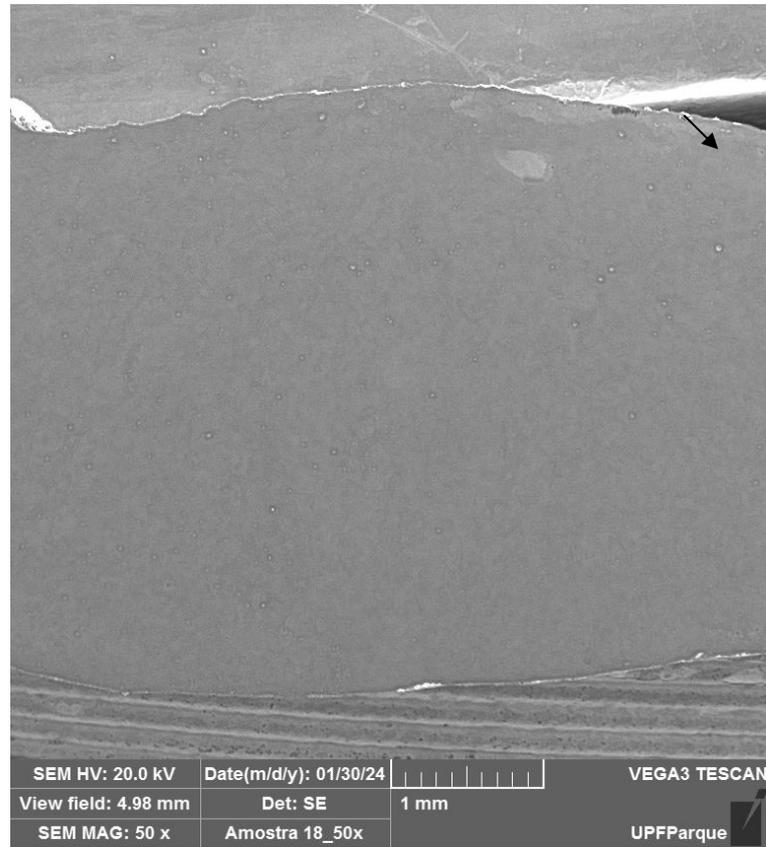
Figura 31 - Microscopia ótica de varredura para junta soldada na condição de arame sólido (ER70S-G) mistura 95%Ar/5%O<sub>2</sub> - amostra 07



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

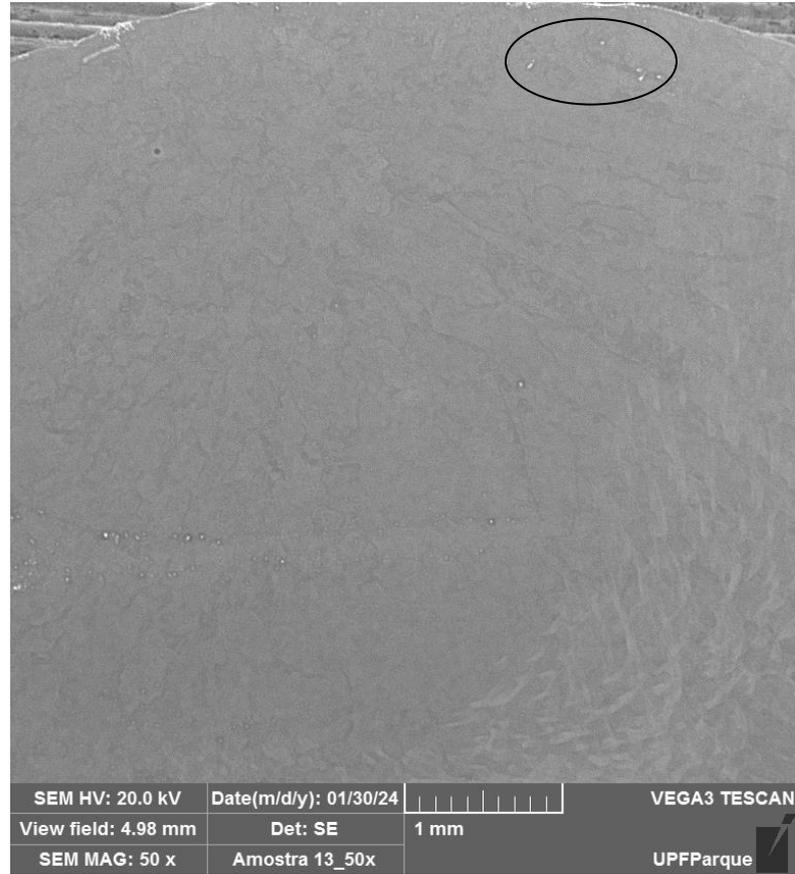
Quando a solda ocorreu com uso de arame tubular de proteção gasosa - condições apresentadas nas Figuras 32, 33 e 34 – a existência de porosidade é menor em relação ao arame sólido, seja na quantidade destes ou no seu tamanho e área que preenchem, estando localizados dispersos na região de metal de adição.

Figura 32 - Microscopia ótica de varredura da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 92% Ar/8% CO<sub>2</sub> - amostra 10



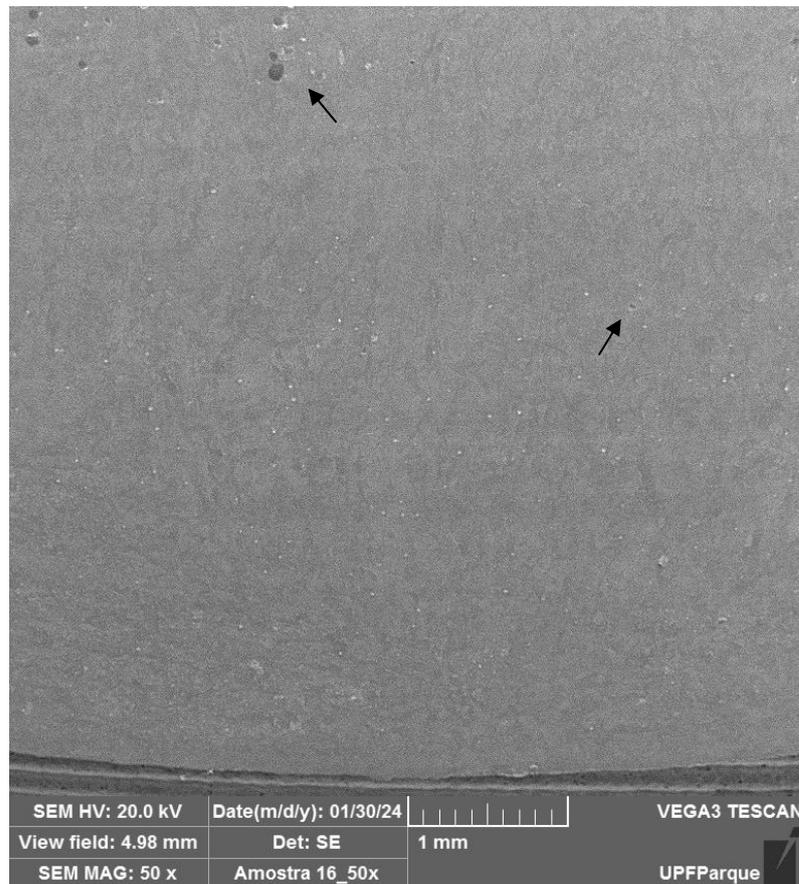
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 33 - Microscopia ótica de varredura da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 80% Ar/20% CO<sub>2</sub> - amostra 13



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

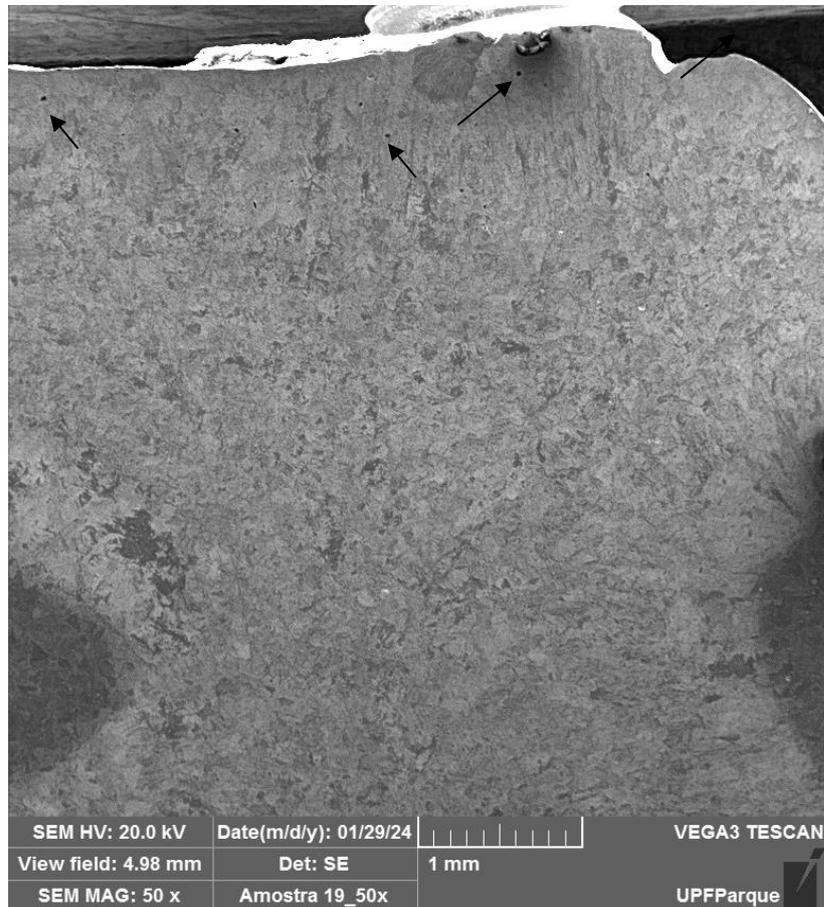
Figura 34– Microscopia ótica de varredura da junta soldada na condição de arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) e mistura 95%Ar/5%O<sub>2</sub> - amostra 16



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na condição do uso do arame tubular sem proteção gasosa auto protegido (Figura 35), se repete comportamento do arame tubular com proteção gasosa, sendo a incidência de poros em pequena quantidade e tamanho, com poros mais próximos da superfície.

Figura 35 – Microscopia ótica de varredura da junta soldada na condição de arame tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M) - amostra 19



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores percentuais da área de porosidade em cada região de metal de adição são obtidos com auxílio do software *ImageJ* e são expressos na Tabela 6, em que mostram predomínio deste defeito, ainda que em índices baixos, quando é utilizado arame sólido.

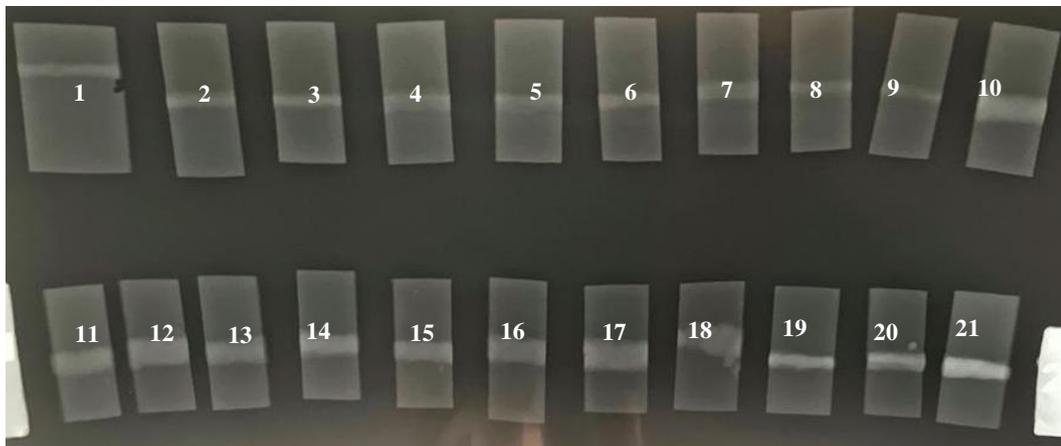
Tabela 6 - Percentuais de porosidade do metal de adição obtidos com microscopia ótica de varredura

Amostra	Arame	Gás (%)	Porosidade (%)
1	Sólido (ER70S-G)	92 Ar + 8 CO <sub>2</sub>	0,13%
4	Sólido (ER70S-G)	80 Ar + 20 CO <sub>2</sub>	0,78%
7	Sólido (ER70S-G)	95 Ar + 5 O <sub>2</sub>	0,42%
10	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	92 Ar + 8 CO <sub>2</sub>	0,10%
13	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	80 Ar + 20 CO <sub>2</sub>	0,06%
16	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	95 Ar + 5 O <sub>2</sub>	0,05%
19	Tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M)	N/A	0,04%

#### 4.4 Raio-X

O ensaio de raio-x corroborou com o ensaio de micrografia, ou seja, agrupando na mesma revelação os 21 experimentos das 7 condições avaliadas, e não demonstrou defeitos ou descontinuidades na região das juntas soldadas em nenhuma das condições. As principais diferenças encontradas foram relacionadas ao tamanho do cordão e sua estabilidade dimensional, onde as amostras soldadas com arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) (amostras 10 a 18) possuem cordões maiores (Figura 36).

Figura 36 – Ensaio de raio-x



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

#### 4.5 Ensaio de tração

Os ensaios de tração apresentaram em todas as condições e respectivas réplicas carga e tensão de escoamento, sendo que a ruptura ocorreu fora da ZAC em todas as condições avaliadas, eliminando a influência da solda e defeitos a ela associados como característica do processo (Figura 37).

Figura 37 – Ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

As tensões de escoamento encontradas em todas as condições são superiores à do metal base (230 MPa), bem como as tensões máximas, pois o aço estudado possui tensão ruptura de 310 Mpa (Tabela 3).

Tabela 7 – Dados do ensaio de tração

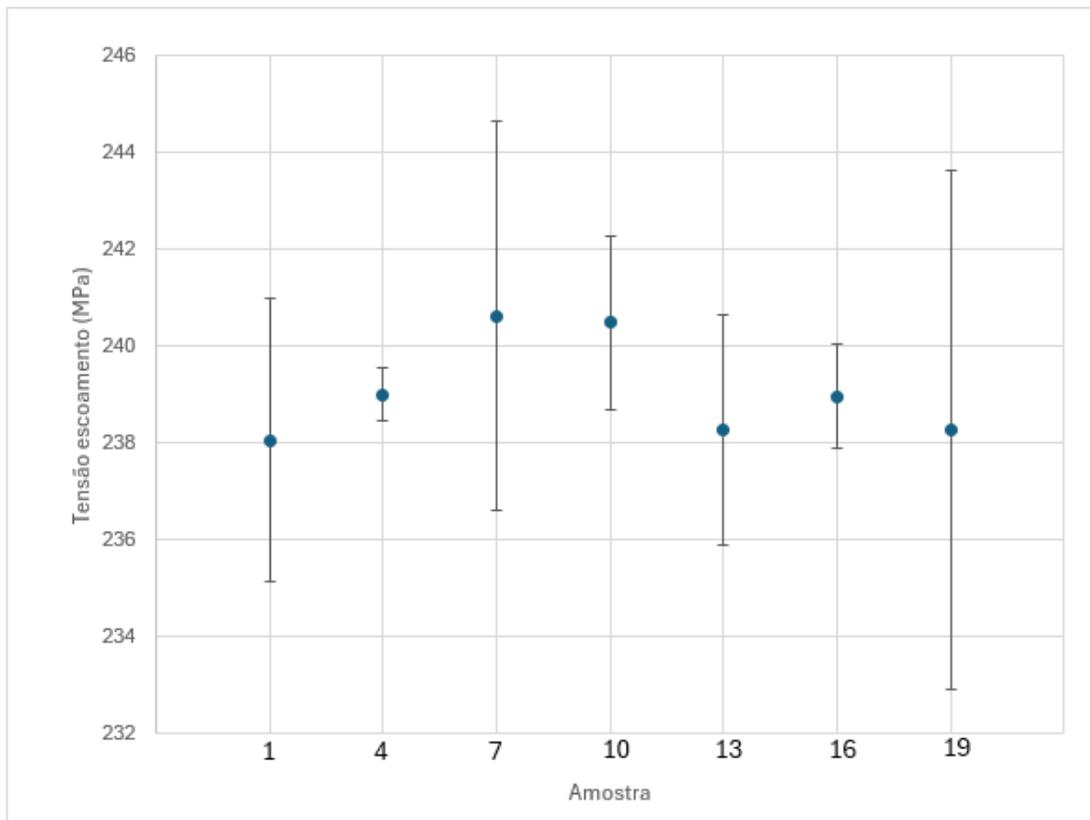
Arame	Amostra	Mistura	Tensão Máxima (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)
Sólido (ER70S-G)	1	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	349,28	235,80	16,18	35,42
	2		350,35	236,99	20,06	33,46
	3		355,48	241,38	23,02	35,68
	1	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	353,05	238,39	24,04	39,18
	2		355,36	239,18	21,27	38,74
	3		348,59	239,43	20,75	39,33
	1	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	343,51	244,86	16,18	39,73
	2		352,58	240,10	23,14	45,40
	3		353,63	236,90	19,02	41,38
Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	1	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	354,71	238,55	18,01	36,70
	2		351,44	242,10	16,61	39,67
	3		346,53	240,80	16,83	40,75
	1	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	348,37	239,16	16,68	34,94
	2		351,46	240,05	15,32	41,81
	3		333,01	235,55	9,63	39,68
	1	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	352,01	240,18	15,59	38,87
	2		344,37	238,23	16,60	35,11
	3		349,28	238,48	15,48	38,81
Tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M)	1	N/A	365,70	243,42	17,32	42,32
	2		358,29	238,67	15,12	42,80
	3		341,69	232,71	14,68	39,54

Embora a falha não tenha ocorrido por defeitos de soldagem e nem atribuída às particularidades de cada condição, é importante entender se as variáveis da pesquisa (tipo de metal de adição e gás de proteção) são significantes aos resultados. Considerando-se o n amostra de três para cada condição ( $n = 3$ ), aplicando a análise de teste Tukey foi possível verificar que para a tensão de escoamento (Tabela 8, Figura 38) e para a tensão máxima (Tabela 9, Figura 39) todas as condições estão no mesmo grupo, dentro da mesma faixa de médias e desvio padrão, não apresentando diferenças significativas nesses parâmetros considerando o tipo de metal de adição ou gás de proteção.

Tabela 8 – Análise Tensão Escoamento (MPa)

<b>Amostra</b>	<b>Arame (Classe AWS - A5.20)</b>	<b>Mistura</b>	<b>N</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Grupo</b>
<b>7</b>	Sólido (ER70S-G)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	240,63	4,01	a
<b>10</b>	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	240,49	2,38	a
<b>4</b>	Sólido (ER70S-G)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	239,004	0,54	a
<b>16</b>	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	238,968	1,06	a
<b>19</b>	Tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M)	N/A	3	238,27	5,37	a
<b>13</b>	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	238,26	2,38	a
<b>1</b>	Sólido (ER70S-G)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	238,06	2,94	a

Figura 38 – Gráfico de médias para tensão de escoamento com intervalo de confiança de 95%

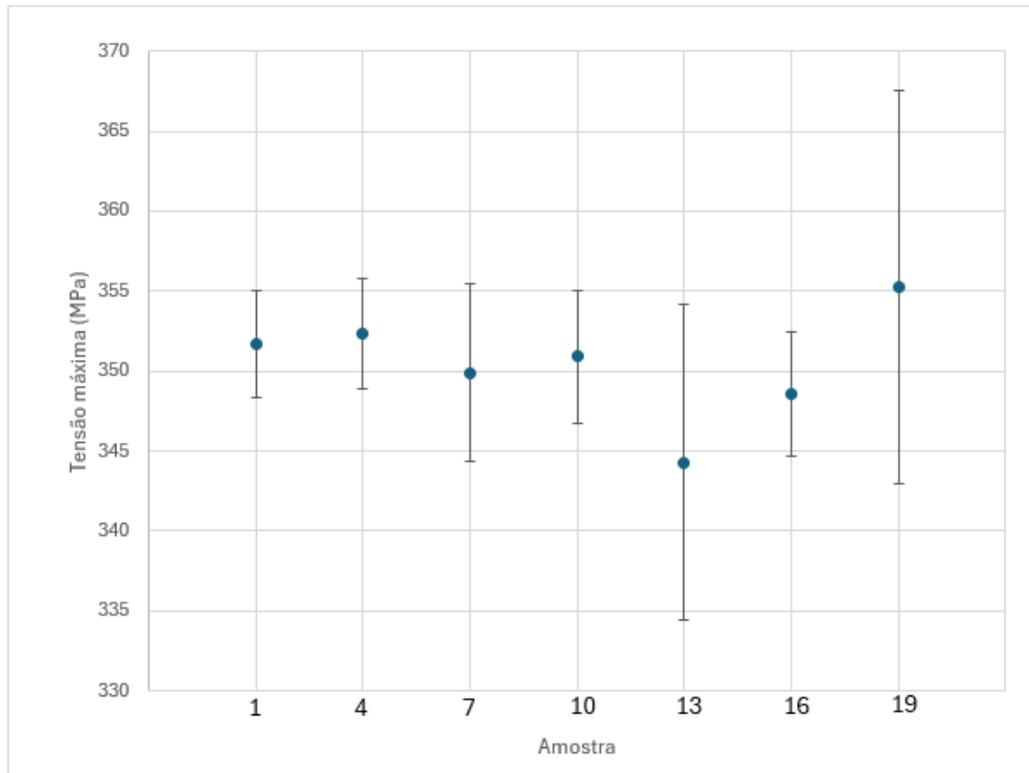


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 9 – Análise Tensão Máxima (MPa)

Amostra	Arame (Classe AWS - A5.20)	Mistura	N	Média (MPa)	Desvio Padrão	Grupo
19	Tubular sem proteção gasosa autoprotégido FCAW-S (E71T-1M)	N/A	3	355,23	12,29	a
4	Sólido (ER70S-G)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	352,33	3,44	a
1	Sólido (ER70S-G)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	351,70	3,31	a
10	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	350,89	4,12	a
7	Sólido (ER70S-G)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	349,91	5,56	a
16	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	348,55	3,87	a
13	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	344,28	9,88	a

Figura 39 – Médias para tensão máxima (MPa) com intervalo de confiança de 95%



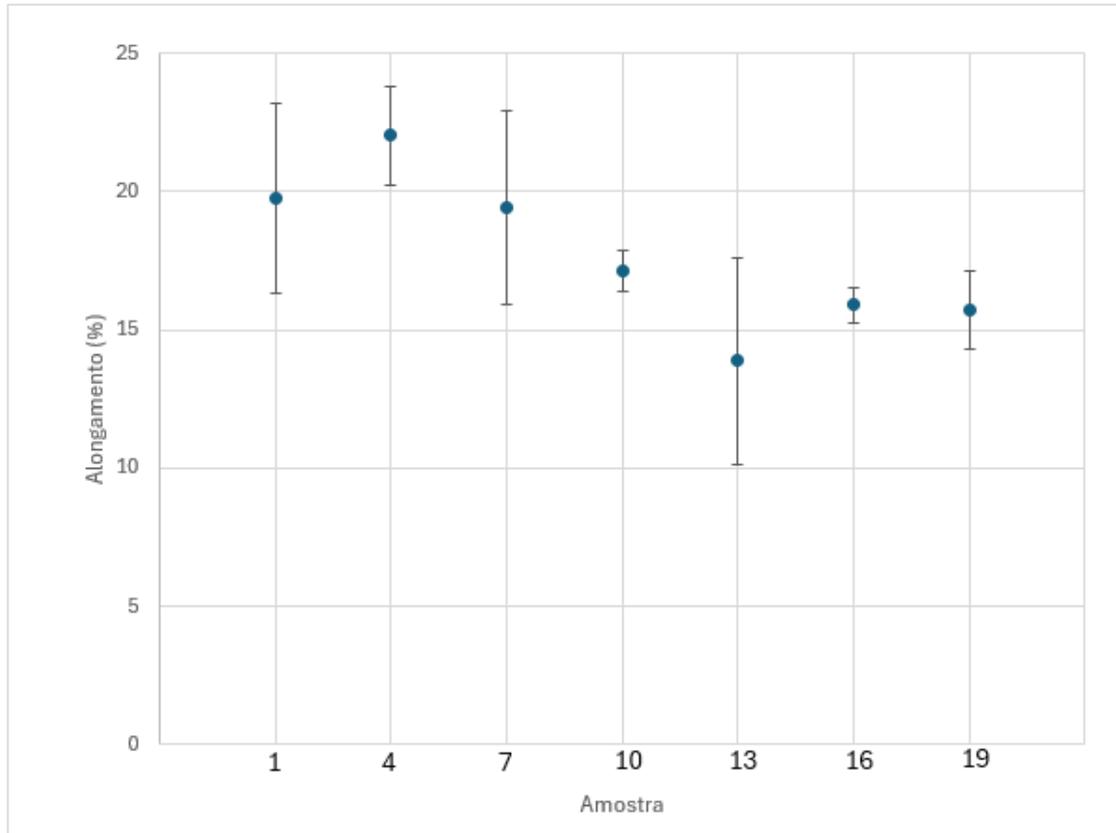
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No entanto, na análise do alongamento com teste Tukey foi possível verificar que há disparidade e formação de 3 grupos distintos, sendo a combinação de arame sólido com mistura 80% Ar/20% CO<sub>2</sub> com melhores propriedades mecânicas, isto é, tendo alongamento superior aos demais (Tabela 10; Figura 40). De maneira oposta, o uso desta mesma mistura de gases de proteção no arame tubular com proteção gasosa resulta na condição mais deficitária para o alongamento (Figura 40).

Tabela 10 – Análise Alongamento (%)

Amostra	Arame (Classe AWS - A5.20)	Mistura	N	Média (%)	Desvio Padrão	Grupo
4	Sólido (ER70S-G)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	22,02	1,77	a
1	Sólido (ER70S-G)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	19,75	3,43	ab
7	Sólido (ER70S-G)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	19,45	3,50	ab
10	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	17,147	0,75	ab
16	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	15,89	0,62	ab
19	Tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M)	N/A	3	15,707	1,41	ab
13	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	13,88	3,74	b

Figura 39 – Média de alongamento (%) em cada condição num intervalo de confiança de 95%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

#### 4.6 Análise de microdureza

A Tabela 11 apresenta a avaliação quantitativa das durezas medidas em cada uma das 7 condições avaliadas em 3 regiões das amostras (metal de adição, ZAC e metal base) com 3 réplicas para cada uma, sendo as durezas expressas em escala Vickers. Em todas as condições foi submetida análise de teste Tukey e em todas elas as 3 regiões avaliadas possuem durezas estatisticamente diferentes entre si, formando 3 grupos, sendo a região de metal de adição ou fundido que advém do arame usado com maior dureza, e o metal base (aço galvanizado) com menores valores de dureza.

Tabela 11 – Perfil de microdureza (HV) em regiões de cada condição avaliada com pós-hoc Tukey

Amostra	Resultados			
	Local	n	Média (HV)	Grupo
Arame sólido (ER70S-G) - 92%Ar/8%CO <sub>2</sub> - Amostra 1	Metal Adição	3	245	a
	ZAC	3	197,33	b
	Metal Base	3	170	c
Arame sólido (ER70S-G) - 80%Ar/20%CO <sub>2</sub> - Amostra 4	Metal Adição	3	199,33	a
	ZAC	3	177	b
	Metal Base	3	128,667	c
Arame sólido (ER70S-G) - 95%Ar/5%O <sub>2</sub> - Amostra 7	Metal Adição	3	204	a
	ZAC	3	137,33	b
	Metal Base	3	121,67	c
Arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) - 92%Ar/8%CO <sub>2</sub> - Amostra 10	Metal Adição	3	238	a
	ZAC	3	147	b
	Metal Base	3	98,6	c
Arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) - 80%Ar/20%CO <sub>2</sub> - Amostra 13	Metal Adição	3	230,33	a
	ZAC	3	114,67	b
	Metal Base	3	112	b
Arame tubular com proteção gasosa (E71T-11) - 95%Ar/5%O <sub>2</sub> - Amostra 16	Metal Adição	3	201,67	a
	ZAC	3	147,33	b
	Metal Base	3	110	c
Tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M) - Amostra 19	Metal Adição	3	220,67	a
	ZAC	3	139,67	b
	Metal Base	3	120,67	c

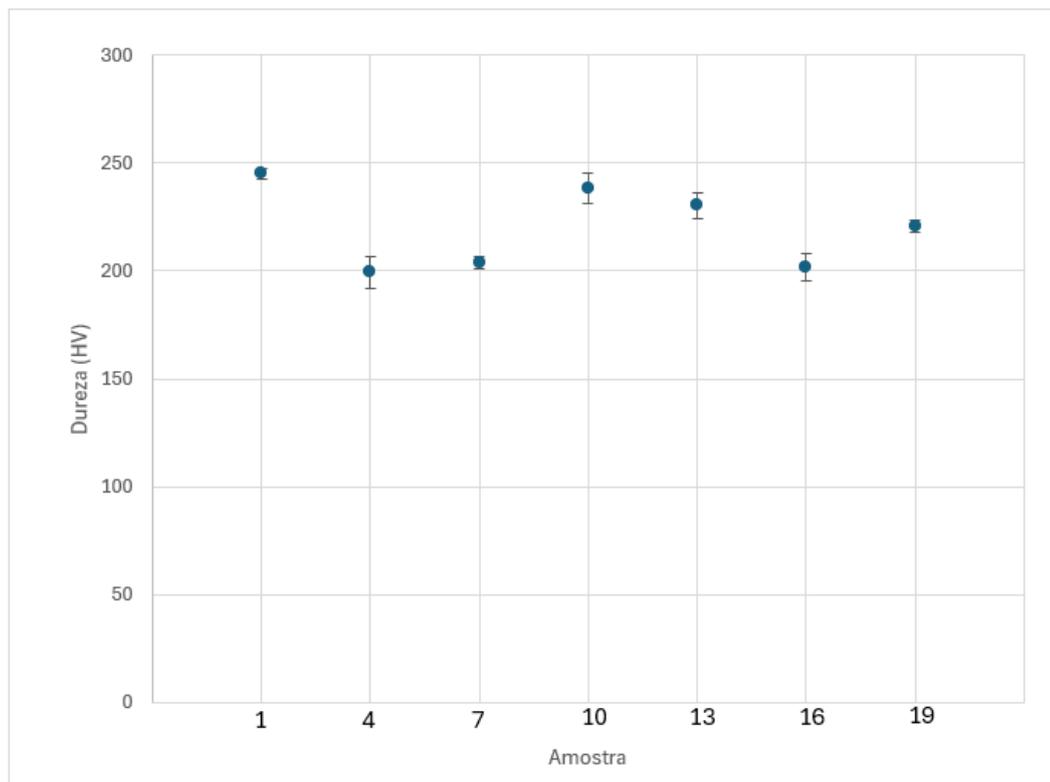
As durezas foram avaliadas comparando-se amostras entre si para duas regiões: a do metal de adição e da ZAC pelo calor com teste Tukey (Tabela 10).

Foi possível observar na região do metal de adição que as condições de arames associadas à mistura de gás 92%Ar/8%CO<sub>2</sub> apresentam resultados significativos de durezas que são superiores aos demais, enquanto a adição de oxigênio na mistura 95%Ar/5%O<sub>2</sub> que reduz o valor de dureza nesta região (Tabela 12; Figura 41).

Tabela 12 – Análise dureza na região de metal de adição entre as condições estudadas

Amostra	Arame (Classe AWS - A5.20)	Mistura	n	Média (HV)	Desvio Padrão	Grupo
1	Sólido (ER70S-G)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	245,00	2,64	a
10	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	238,00	7,00	a
13	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	230,33	5,86	ab
19	Tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M)	N/A	3	220,67	2,52	b
7	Sólido (ER70S-G)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	204,00	2,64	c
16	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	201,67	6,51	c
4	Sólido (ER70S-G)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	199,33	7,64	c

Figura 40 – Gráfico de médias de dureza (HV) na região de metal de adição para cada amostra avaliada num intervalo de confiança de 95%



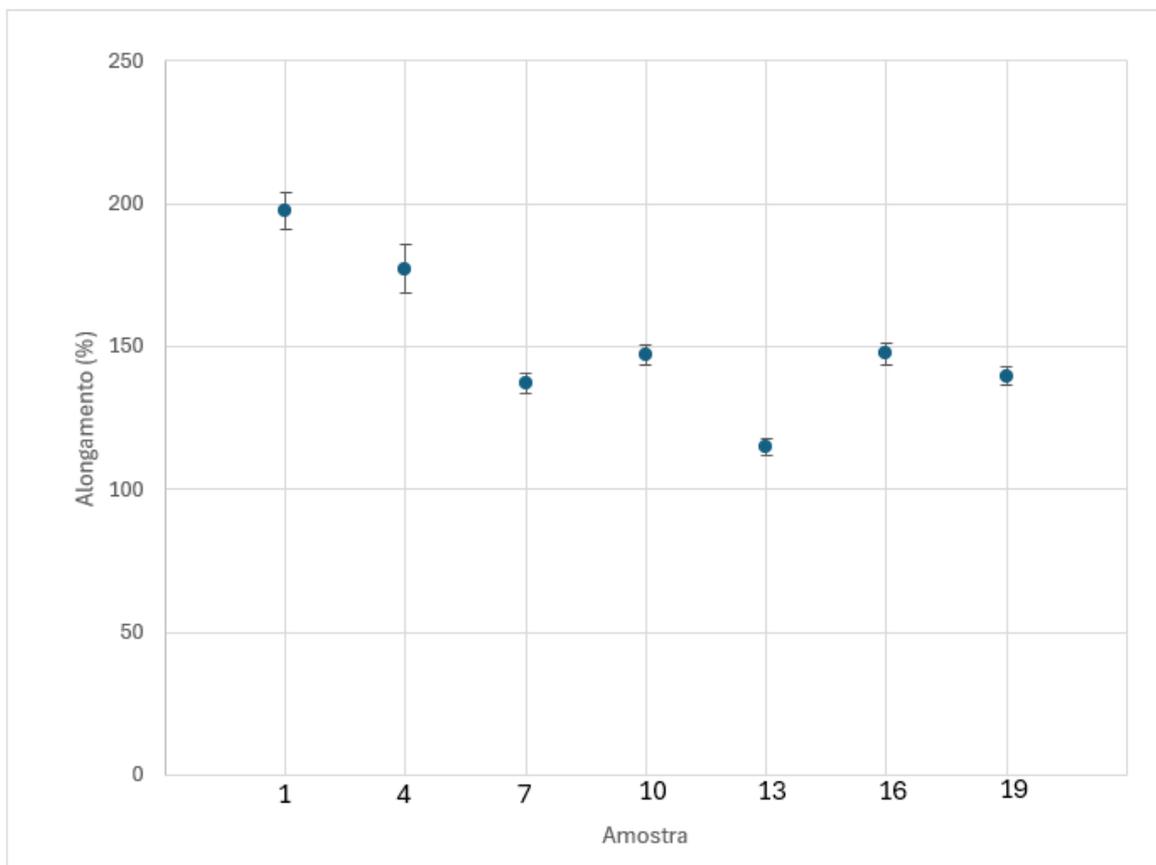
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Já na ZAC foram encontrados 4 grupos significativamente de durezas diferentes, com durezas maiores para as condições de arame sólido e mistura de argônio e dióxido de carbono, sendo a configuração de maior quantidade de argônio (92%) a de maior dureza. Porém, esse tipo de mistura de gases associado ao arame tubular com proteção gasosa resultou na dureza de menor valor (amostra 13) (Tabela 13; Figura 42).

Tabela 13 – Análise dureza na região da zona afetada pelo calor entre as condições estudadas

Amostra	Arame (Classe AWS - A5.20)	Mistura	n	Média (HV)	Desvio Padrão	Grupo
1	Sólido (ER70S-G)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	197,33	6,43	a
4	Sólido (ER70S-G)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	177,00	8,54	b
16	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	147,33	4,04	c
10	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	92% Ar/8% CO <sub>2</sub>	3	147,00	3,46	c
19	Tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S (E71T-1M)	N/A	3	139,67	3,05	c
7	Sólido (ER70S-G)	95% Ar/5% O <sub>2</sub>	3	137,33	3,51	c
13	Tubular com proteção gasosa (E71T-11)	80% Ar/20% CO <sub>2</sub>	3	114,67	3,05	d

Figura 41 – Gráfico de médias de dureza (HV) na região de zona afetada pelo calor para cada amostra avaliada num intervalo de confiança de 95%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

## 5. DISCUSSÃO

A série de ensaios com diversas técnicas facilitou a formação de uma visão global de como as variáveis do tipo de arame e gás de proteção impactam na região de solda em aço galvanizado.

Com a micrografia ficou evidente que a etapa de aquecimento não provocou grande transformação do metal base, visto que tanto o aço galvanizado como zona de metal de adição fundido são afetadas pelo calor e se caracterizam por ferrita em formas distintas (acicular, poligonal e Widmanstätten). Segundo Mazzaferro (2008) a última dessas ferritas a surgir na transformação da solda proporcional ao aumento de temperatura é a de Widmanstätten, e ao ter presença apenas nas condições de solda com arame sólido e gás de proteção 95% Ar/5% O<sup>2</sup> e arame tubular autoprottegido, acredita-se que o pico de temperatura nestas condições foi maior que nas demais.

A predominância de ferrita acicular e poligonal observada, segundo Bubnoff e Ventrella (2002), pode oferecer baixa resistência à propagação de trincas prejudicando a tenacidade. Da mesma forma, o tamanho dos grãos influencia nas propriedades mecânicas e, nesse aspecto, a caracterização da ZAC em todas as condições avaliadas com grãos de maior área e extensão podem favorecer a formação de trincas de fadiga na sua aplicação. No entanto, essa fragilidade não se mostrou presente nos ensaios de tração, advinda da prevalência de ferrita acicular, que confere aos cordões de solda boa resistência (DALTRO, 2000). Além disso, chama a atenção que a camada protetiva de zinco na análise de micrografia não se mostrou significativa para formação de microestruturas. Esse fato foi corroborado na análise de microscopia eletrônica de varredura.

Defeitos pontuais como a presença de inclusões na microestrutura, percebidos no aumento da proporção de dióxido de carbono podem ser justificados pelo que Teske (2006) avalia como aplicação de gases com potencial oxidante, CO<sup>2</sup> ou O<sup>2</sup>, que podem causar a diminuição de elementos de liga do metal fundido e gerar grande quantidade de inclusões de óxidos. A existência de porosidade foi identificada em todos as condições, porém com predomínio para uso de arame sólido.

A dureza aumenta na região de ZAC e metal fundido em relação ao metal base assim como nos resultados de Giarollo et. al (2019), podendo esta ser menor no metal de base por ser constituído por uma matriz de ferrita, comportamento que pode ser justificado pela presença de ferrita acicular na zona fundida e a presença de Mn nos metais de adição utilizados (níveis de

1,4 e 1,75% para arame sólido e tubulares, respectivamente) sendo que a variação da dureza se deu pelo tipo de gás de proteção e não pelo tipo de arame.

Outro ponto a se destacar que pode ser percebido na macrografia e inspeção por raio-x foi a maior largura de cordão e dificuldade de estabilização de arco para condições com arames tubulares. Sales (2002) mostra através de estudos que a melhor combinação de gás de proteção para solda para aço com arame tubular é o uso de argônio combinado com dióxido de carbono agregando aspecto com uma melhor conformação do cordão, reduzindo a formação de pontos de concentração de tensão e melhorando o aspecto do depósito. No entanto, diferentemente do esperado e visto no estudo de Groetelaars (2005), não foi identificado aumento da área fundida devido a utilização do CO<sub>2</sub>.

Nos ensaios conduzidos as soldas com arames tubulares, seja do tipo com proteção gasosa ou autoprottegido, não gerou resultados significativos determinantes de mudança de dureza ou morfologia microestrutural ao contrário de pesquisas como as de Arivazhagan e Kamaraj (2013) que observou aumento da dureza na solda usando arame tubular em comparação com arame sólido ou Starling et. al (2009) que observou aumento tamanho de grão devido ao uso do arame tubular. A isso, pode estar atribuído a espessura do metal base e a baixa concentração de carbono do aço galvanizado escolhido, que reduz os benefícios demonstrados na literatura para uso de arame tubulares em peças de grande espessura ou maior teor de carbono.

Assim como na pesquisa de Chen (1999), foi possível verificar que as composições dos gases de proteção têm efeitos significativos nas propriedades do metal de solda do aço quando utilizado arame de soldagem sólido, porém leve efeito nas propriedades do metal de solda do aço inoxidável usando arame tubular. Nas amostras FCAW, as taxas de respingos é influenciada apenas pelo fluxo.

Os defeitos observados - inclusões, aspecto de cordão, porosidade – embora não apresentaram danos nas propriedades mecânicas avaliadas podem ter impacto negativo mais pronunciado na vida em fadiga das uniões.

Para essa condição operacional de procedimento de soldagem e metal base, a combinação do arame sólido ER70S-G com mistura 92%Ar/8%CO<sub>2</sub> demonstrou ser a mais adequado por trazer uma melhor estabilidade de arco elétrico em relação as demais condições operacionais, melhorando o aspecto de geometria do cordão na análise de macrografia. Nos ensaios, apresentou maior dureza tanto para ZAC (197,33 MPa) quanto para zona fundida de metal de adição (245 MPa), o segundo maior índice de alongamento no ensaio de tração (19,75%) e os mesmos níveis de tensão de escoamento e máxima que outras condições.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que o fator dominante para diferenciar as condições avaliadas foi a presença de defeitos, gerado ora pelas aplicações de arame tubulares, ora pela variação de gás de proteção e pela combinação dos dois fatores. No entanto, estes defeitos não geraram alterações nas propriedades mecânicas devido ao cordão ter reforço de soldagem grande.

Ao contrário do esperado, a adoção de arame tubular não trouxe ganhos ao processo de soldagem, dificultando a estabilização de arco. Isso pode estar atrelado a baixa espessura do metal base bem como baixo teor de carbono deste. Na análise do alongamento obtida no ensaio de tração os grupos de significância estatística indicam os melhores resultados para arame sólido. O gás de proteção se mostrou importante por estar associado a variação de dureza, com as maiores durezas encontradas em condições da mistura 92%Ar/8%CO<sub>2</sub>. Em duas condições de uso de arame tubular (arame tubular com proteção gasosa E71T-11 e mistura 92%Ar/8%CO<sub>2</sub>; e arame tubular sem proteção gasosa autoprottegido FCAW-S E71T-1M) foi identificada existência de porosidade, indicando que há problemas de proteção do arco elétrico.

Para todas as condições avaliadas, o rompimento no ensaio de tração se deu fora da região fundida e ZAC, mostrando superioridade de propriedades mecânicas da região soldada em relação ao aço do metal base. Embora todas as condições avaliadas apresentem propriedades mecânicas adequadas, dentre elas a combinação de arame sólido (AWS ER70S-G) com mistura 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub> foi a que trouxe resultados superiores para as propriedades de resistência a tração e dureza quando comparada às demais as condições avaliadas.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Frente aos resultados obtidos, sugere-se para continuidade na abordagem da problemática apresentada, a realização de avaliações de novas técnicas de soldagem e avanço na discussão e análise do comportamento e vida em fadiga.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7008**. Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou com liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente – Especificação. Rio de Janeiro, 2003.
- AHSAN, R. U. *et al.* Cold metal transfer (CMT) GMAW of zinc-coated steel. **Welding Journal**, v. 95, p. 120-132, 2016.
- ARIAS, A. R.; BRACARENSE, A. Q. Velocidade de propagação de trinca por fadiga de soldas subaquáticas molhadas: avaliação fora da água. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 4, p. 403-411, 2015.
- ARIVAZHAGAN, B.; KAMARAJ, M.; Metal-cored arc welding process for joining of modified 9Cr-1Mo (P91) steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 15, p. 542-548, 2013.
- ASSIS, J. R. C.; ASSIS, G.; FERREIRA, W. P.; OLIVEIRA, A. M. Eliminação do processo de queima na fabricação de arame tubular para soldagem. **Revista Espacios**, v. 38, n. 26, p. 14-25, 2017.
- AVENTA. Guia (rápido) de soldagem por arame tubular. Aventa, 2020. Disponível em: <https://aventa.com.br/novidades/guia-rapido-de-soldagem-por-arametubular>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- AWS. American Welding Society. **AWS A5.20**. Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding. American Welding Society, Inc., 1995.
- BABKIN, A. S.; GLADKOV, E. A. Identification of welding parameters for quality welds in GMAW. **Welding Journal**, v. 95, n. 1, p. 37-46, 2016.
- BANG, H. *et al.* Application of Taguchi approach to optimize laser-arc hybrid welding parameters of galvanized steel. **Strength of Materials**, v. 48, n. 1, p. 146-151, 2016.
- BARBEDO, N. D. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.
- BUBNOFF, D. V.; VENTRELA, V.A. Efeito da tensão do arco elétrico em soldagem por arame tubular com eletrodo AWS E-81T1-Ni1 na microestrutura do metal de solda. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat)*, 15o, 2002.
- CHACÓN-FERNÁNDEZ, S.; PORTOLÉS GARCÍA, A.; ROMANÍ LABANDA, G. Influence of parameters on the microstructure of a duplex stainless steel joint welded by a GMAW welding process. **Progress in natural science: communication of state key laboratories of China**, v. 32, n. 4, p. 415-423, 2022.
- CHEN, W. J.; LIAO, M. T. A Comparison of Gas Metal Arc Welding with Flux-Cored Wires

and Solid Wires Using Shielding Gas. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 15, p. 49-53, 1999.

CHEN, X.; HU, C.; WU, Y. The formation and control of porosity during GMA welding of galvanized steel. *In: Transactions on Large-Scale Data- and Knowledge-Centered Systems XLI*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.

COLPAERT, H. **Metallography of steels**. United States of America: ASM Internation, 2018.

COSTA, R. F. **Tensão residual e distorção induzidas por soldagem em uma viga T**. 2017. 77 f. Monografia (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

DALTRO, A. T. **Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa em juntas de chapas finas de aço**. 2000. 178 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

DAS, S. *et al.* Experimental Investigation on welding of 2.25 Cr- 1.0 Mo steel with Regulated Metal Deposition and GMAW technique incorporating metal-cored wires. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 1007-1016, 2021.

FARIAS, J. P.; LUZ, T. D.; RODRIGUES, C. A. Estudo da Operacionalidade do Arame Tubular AWS E71T-1. *In: CONAMET/SAM – Simpósio Materia*, 2002.

FENG, S.; JIANG, S.; LI, Y.; LI, Z.; YUAN, X.; ZHANG, Q.. Influence of oxide morphologies on galvanizability of third generation automotive steel. **Journal of Iron and Steel Research**, v. 21, n. 11, p. 1059-1064, 2014.

FERRARI, V. R. **Estudo sobre a formação da interface em soldas dissimilares de alumínio e aço galvanizado durante o processo de soldagem por fricção por ponto (RFSSW) com controle por carga**. 2022. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

GAO, X. Penetration state recognition based on stereo vision in GMAW process by deep learning. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 89, p. 349-361, 2023.

GIAROLLO, D. F.; MAZZAFERRO, C. C. P.; MAZZAFERRO, J. A. E. Efeito do metal de adição na resistência ao desgaste por deslizamento de um aço estrutural soldado por GMAW. **Revista Matéria**, v. 24, n. 3, p. 1-12, 2019.

GROETELAARS, P. J. **Influence of the weld parameters on metal transfer and weld bead profile in double wire MIG/MAG process**. 2005. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

HONG, S. M. *et al.* Effect of gap bridging distance on the weldability of aluminum alloy to galvanized steel joints in AC Pulse GMAW. **Metals and Materials International**, v. 29, p. 1133-1144, 2023.

HENCKELL, P. *et al.* Reduction of energy input in wire arc additive manufacturing (WAAM) with gas metal arc welding (GMAW). **Materials**, v. 13, n. 11, p. 1-18, 2020.

ICZ. Instituto de Metais Não Ferrosos. **Guia de galvanização por imersão a quente**. São Paulo, 2010. Disponível em: [https://www.galvanisa.com.br/files/guia-de-galvanizacao-por-imersao-a-quente\(icz\).pdf](https://www.galvanisa.com.br/files/guia-de-galvanizacao-por-imersao-a-quente(icz).pdf). Acesso em: 15 maio 2023.

ISHAK, M.; RAFIQUL, M. I.; RAHMAN, M. M. Effects of heat input on mechanical properties of metal inert gas welded 1.6 mm thick galvanized steel sheet, **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Volume 36, Issue 1, pp. 012011, 8 pp., 2012.

IZUTANI, S.; YAMAZAKI, K.; SUZUKI, R. New welding process J-Solution Zn suitable for galvanized steel in the automotive industry. **Kobelco Technology Review**, v. 32, p. 16-23, 2013.

JEONG, Y.-C.; CHO, Y.-T.; JUNG, Y.-G. Amount of spatter in arc welding for high-strength galvanized steel according to shielding gas composition. **Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers**, v. 15, n. 1, p. 110-115, 2016.

JIN, Y. *et al.* Microstructure and mechanical properties of plasma arc brazed AISI 304L stainless steel and galvanized steel plates. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 25, n. 4, p. 1327-1335, 2016.

JOAQUIN, A. *et al.* **Gas metal arc welding of coated advanced high strength steel (AHSS)** - developments for improved weld quality. *Welding & Joining & Fastening & Friction Stir Welding: SAE Technical Paper Series*, 2007.

KAH, P. *et al.* Assessment of arc stability features for selected gas metal arc welding conditions. **SN Applied Science**, v. 4, p. n. 268, p. 1-21, 2022.

KAM, D.-H.; LEE, T. H.; KIM, J. Porosity reduction through a Ti particle based gap-paste in arc welding of zinc coated steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 258, p. 211-219, 2018.

KAM, D. H. *et al.* Weld quality improvement and porosity reduction mechanism of zinc coated steel using tandem gas metal arc welding (GMAW). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 294, n. 117127, p. 1-10, 2021.

KIM, C. *et al.* Relationship between the weldability and the process parameters for laser-TIG hybrid welding of galvanized steel sheets. **Materials transactions**, v. 49, n. 1, p. 179-186, 2008.

KIM, D-Y. *et al.* Effect of Porosity on the fatigue behavior of gas metal arc welding lap fillet joint in GA 590 MPa steel sheets. **Metals**, v. 8, n. 4, p. 1-13, 2018.

KODAMA, S.; MIYAZAKI, Y.; NOSE, T.; SAITO, M. Arc welding technology for automotive steel sheets. **Nippon Steel Technical Report**, v. 103, p. 83-90, 2013.

KUKLIK, V.; KUDLAČEK, J.; Hot-Dip galvanizing of steel structures. Oxford: Elsevier Ltd, 2ed. 234p. 2016.

LEUNG, C. L. A.; LEE, P. D.; MARUSSI, S.; TOWRIE, M.; WHITERS, P. The effect of powder oxidation on defect formation in laser additive manufacturing. **Acta Materialia**, v. 166, p. 294-305, 2019.

LYNCH, R. F. Zinc: alloying, thermomechanical processing, properties, and applications. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, p. 9869-9883, 2001.

MA, G.; YUAN, H.; YU, L. et al. Monitoring of weld defects of visual sensing assisted GMAW process with galvanized steel. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 36, n. 10, p. 1178-1188, 2021.

MAIA, I. G. **Efeito da Camada de Nitretos na Porosidade em Soldas de Eixos Automotivos**. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MANHABOSCO, S. M. **Avaliação do comportamento corrosivo de aços galvanizados utilizando microssondas eletroquímicas**. 2017. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MARQUES, P. V. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MATSUI, H.; SHIONOYA, S. Reduction of blowholes by vibration of the molten pool in arc welding of galvanized carbon steel sheet. **Welding International**, v. 12, n. 12, p. 959-965, 1998.

MAZZAFERRO, C. C. P. **Soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica de um aço TRIP800: Processo, microestrutura e propriedades**. 2008. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MEI, L. *et al.* Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 47, n. 11, p. 1117-1124, 2009.

MIRANDA, H. C. **Influência da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição sobre cabeça**. 1999. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1999.

MVOLA, B.; KAH, P.; LAYUS, P. Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 9-12, p. 4243-4265, 2018.

NARAYANAN, B. et al. Solutions for welding zinc coated steels. *In: Proceedings Conference Sheet Metal Welding Conference XVI*. Livonia, Michigan: American Welding Society (Detroit Section), 2014.

NOGUEIRA, R. M. U. **Variabilidade do cordão de solda nos processos de soldagem MIG/MAG e arame tubular**. 2015. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

PESSOA, E. C. P. **Estudo da porosidade ao longo do cordão em Soldas subaquáticas molhadas**. 2007. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

PUÑALES, E. M. M.; ALFARO, S. C. A. Stability on the GMAW Process. In: ALFARO, S.; BOREK, W.; TOMICZEK, B. (Org.). **Welding: Modern Topics**. Intechopen, 2021.

POTTER, T. J. *et al.* Comparison of metallurgical and ultrasonic inspections of galvanized steel resistance spot welds. **Review of Quantitative Nondestructive Evaluation**, v. 25, p. 1786-1793, 2006.

ROSSI, S.; PINAMONTI, M.; CALOVI, M. Influence of soil chemical characteristics on corrosion behavior of galvanized steel. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. 1-16, 2022.

SALES, J. C. **Efeito do tipo de gás de proteção sobre o desempenho do arame tubular AWS E71T-1, utilizando processo convencional e pulsado**. 2002. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

SHIN, S.; KIM, M. S.; RHEE, S. Prediction of weld porosity (pit) in gas metal arc welds. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, p. 1109-1120, 2019.

SHREYAS, P.; PANDA, B.; KUMAR, R. Mechanical properties and microstructure of 316L-galvanized steel weld. **Materials Today: Proceedings**, v. 23, p. 600-607, 2020.

SHREYAS, P.; PANDA, B.; VISHWANATHA, A. D. Embrittlement of hot-dip galvanized steel: A review. In: **AIP Conference Advancements in Aeromechanical Materials for Manufacturing**. ICAAMM, 2021.

SILVA, J. F. **Caracterização mecânica e microestrutural do aço DP1200 soldado pelo processo GMAW**. 2021. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2021.

SILVA, E. B.; MACIEL, T. M. Influência da velocidade de correntes de ar sobre a porosidade em juntas soldadas pelo processo MIG/MAG. **Matéria**, v. 27, p. 1-13, 2023.

SOUZA, M. H. M.; QUINTÃO, W. P. **Análise da Influência dos metais de adição na soldagem de chapas de aço microligado galvanizadas soldadas pelo processo GMAW robotizado**. 2016. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Soldagem) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. Comparison of operational performance and bead characteristics when welding with different tubular wires. **Welding International**, v. 24, n.8, p. 579-592, 2009.

SUMESH, A. *et al.* Decision tree based weld defect classification using current and voltage signatures in GMAW process. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 8354-8363, 2018.

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 3, p. 218-228, 2012.

TESFAYE, F. K. Parameter optimizations of GMAW process for dissimilar steel welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 126, n. 9-10, p. 4513-4520, 2023.

TESKE, M. **Influência da composição do gás de proteção na soldagem do aço ASTM A516 pelo processo GMAW**. 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

THEKKUDEN, D. T.; MOURAD, A.-H. I.; SHERIF, M. M. Response surface analysis of statistical features of voltage and current in a GMAW powersource on welding v-groove joints. **Anais... Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)**. IEEE, 2020.

THOMPSON MARTÍNEZ, R. *et al.* Analysis of GMAW process with deep learning and machine learning techniques. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 62, p. 695-703, 2021.

TREVISAN, R. E.; MAIA, I. G. Análise da porosidade em juntas soldadas pelo processo MIG/MAG robotizado. *In: Anais...* Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Águas de São Pedro, 2007.

THEWLIS, G. Classification and quantification of microstructures in steels. **Materials Science and Technology**, v. 20, n. 2, p. 143-160, 2004.

VIANA, A. F. **Soldabilidade do aço AISI 304l pelos processos arame tubular e MIG/MAG**. 2003. 88 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

VIDYARTHY, R. S.; DWIVEDI, D. K. Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 22, p. 211-228, 2016.

WALUNJ, M. G. *et al.* Role of dew points and Fe pre-coats on the galvanizing and galvannealing of dual phase steel. **Surface & Coatings Technology**, v. 422, n. 127573, p. 1-13, 2021.

WICKBOLDT, E. B. **Avaliação da soldabilidade do aço galvanizado NBR 7008 ZAR-230 por meio do processo GMAW utilizando transferências por curto circuito e por corrente controlada**. 2014. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

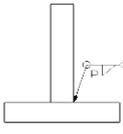
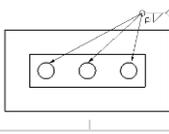
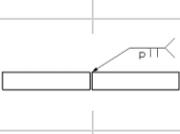
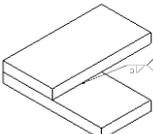
XIONG, W. *et al.* Weld zone porosity elimination process of galvanized steel zero-gap lap joints in remote laser spiral welding. **Materials Research Express**, v. 8, n. 6, p. 1-16, 2021.

YU, J.; CHO, S. M. Metal-cored welding wire for minimizing weld porosity of zinc-coated steel. **Journal of Materials Processing**, v. 249, p. 350-357, 2017.

YU J.; KIM, D. Effects of welding current and torch position parameters on minimizing the weld porosity of zinc-coated steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, p. 551-567, 2018.

ZHANG, Q. *et al.* Modeling of hydrogen porosity formation during solidification of dendrites and irregular eutectics in Al–Si alloys. **Materialia**, v. 4, p. 211-220, 2018.

## ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM		Pag:	1/1		
Revisão:	0	EPS 0005/21	RQP: 0006/21 0007/21 0008/21 0009/21 0010/21 0011/21 0012/21		
<b>Processo de soldagem - MAG - SAMG</b>					
<b>Croquis da Solda</b>					
					
p: perna Junta Ângulo	Junta sobreposta Solda de Contorno	Junta Topo	Junta Sobreposta		
<b>Metal de Base</b>		<b>Gás</b>			
PN°:	P1 C/ P1	Tipo de Gás de Proteção:	CO2/AR		
Faixa de Espessuras (mm):	2.10 a 4.75	Composição (%):	20-CO2 / 80-AR		
Faixa de Diâmetros (mm):	40x60x2.00 a 100x60x4.2	Vazão l/min:	08 a 20		
Outros:	NA	Outros:	N/A		
<b>Metal de Adição</b>		<b>Parâmetros Elétricos</b>			
Especificação (SFA) N°:	A5. 18	Corrente:	CC+ (positiva)		
Classe (AWS D1.1) N°:	ERS70S6	Polaridade:	Inversa		
Outros:	Ø 1,0mm	Tensão:	17V - 19V		
		Corrente:	130 A - 170 A		
		Outros:			
<b>Posição</b>		<b>Técnica</b>			
Posição:	1F,2F,3F,4F,1G,2G,3G,4G	Preparação:	Serra / Guilhotina/Plasma/Laser		
Progressão:	Puxando / Empurrando	Limpeza:	Escova / Lixadeira		
Outros:	Junta em ângulo / Sobreposta / Topo	Cordão:	Reto		
Espessura da perna (mm):	2 a 4	Passe:	Simples/Multipasses		
		Velocidade de Soldagem:	300 - 350 mm/min		
		Outros:	NA		
<b>Pré Aquecimento</b>		<b>Tratamento Térmico</b>			
Temperatura Pré Aquecimento:	NA	Tipo:	NA		
Temperatura Interpasse:	NA	Temperatura:	NA		
Manutenção Pré Aquecimento:	NA	Duração:	NA		
Outros:	NA	Outros:	NA		
EPS Baseada nos Requisitos da Norma AWS D1.1					
<b>Registro de Alterações</b>					
Rev.	Item	Descrição	Data	Treinamento	
				Sim	Não
0	Todo Procedimento	Adequação a Norma AWS D1.1	16/03/2021	X	
<b>Elaboração</b>		<b>Setor</b>	<b>Função</b>	<b>Assinatura</b>	
Ben-Hur Abrahão		Engenharia Industrial	Processista JR		
<b>Coordenador Produção</b>		<b>Coordenador Eng. Industrial</b>	<b>Coordenador da Qualidade</b>		
Eder Luiz Wickert		Ricardo Augusto Fensterseifer	Cassio Andreatta		

## ANEXO B - FICHAS TÉCNICA DOS ARAMES TUBULARES

ARAMES SÓLIDOS

AÇO CARBONO



### OK Aristorod 38 Zn

O OK Aristorod 38 Zn sem revestimento de cobre é um arame sólido com liga de manganês e silício desenvolvido exclusivamente para soldagem de aços galvanizados com gás de proteção (GMAW), e um desempenho extraordinário em termos de baixa porosidade, poucos respingos e risco reduzido de perfuração. O arame pode ser soldado com uma mistura de gases (M20/M21). O OK Aristorod 38 Zn é fornecido em carretéis de 15/18kg para soldagem manual e em grandes embalagens Marathon Pac 200/250kg, ideal para aplicações de soldagem mecanizada/robotizada.

<b>Classificação do Consumível</b>	SFA/AWS A5.18 : ER70S-G EN ISO 14341-A : G Z 3Si1
<b>Classificações</b>	SFA/AWS A5.18 : ER70S-G EN ISO 14341-A : G 42 3 M20 Z 3Si1 EN ISO 14341-A : G 42 3 M21 Z 3Si1 EN ISO 14341-A : G Z 3Si1
<b>Aprovações</b>	CE EN 13479

As aprovações são baseadas em cada unidade de produção. Para mais informações, contate a ESAB.

<b>Tipo da Liga</b>	Carbon-manganese steel (Mn/Si-alloyed)
<b>Gás de protecção</b>	M20, M21 (EN ISO 14175)

#### Propriedades Típicas de Tensão

Condição	Limite de escoamento	Resistência à Tração	Alongamento
<b>AWS M20</b>			
Como Soldado	450 MPa	550 MPa	30 %
<b>AWS M21</b>			
Como Soldado	440 MPa	540 MPa	29 %
<b>EN ISO M20</b>			
Como Soldado	440 MPa	550 MPa	30 %
<b>M21 EN ISO</b>			
Como Soldado	440 MPa	540 MPa	29 %

#### Teste Charpy

Condição	Temperatura de Teste	Valor de Impacto
<b>AWS M20</b>		
Como Soldado	-30 °C	140 J
<b>AWS M21</b>		
Como Soldado	-30 °C	120 J
<b>EN ISO M20</b>		
Como Soldado	-30 °C	110 J
Como Soldado	-40 °C	110 J
<b>M21 EN ISO</b>		
Como Soldado	-30 °C	100 J
Como Soldado	-40 °C	100 J

#### Typical Weld Metal Analysis %

C	Mn	Si	S	P
0.07	1.1	0.6	0.01	0.01

#### Typical Wire Composition %

C	Mn	Si
0.07	1.4	0.8

#### Deposição

Diâmetro	Corrente	Tensão	Velocidade de alimentação do arame	Taxa de Deposição
0.8 mm	50-150 A	15-21.5 V	3.2-11.7 m/min	0.72-2.66 kg/h
1.0 mm	100-300 A	16.5-34.5 V	4.0-14.6 m/min	1.37-5.15 kg/h
1.2 mm	100-300 A	15.5-28 V	2.5-9.6 m/min	1.2-4.8 kg/h

LINCOLN ELECTRIC DO BRASIL

AÇO CARBONO – ARAME TUBULAR

# MEGACORE 71 DG

AWS A5.20: E71T-1C / E71T-9C / E71T-1M / E71T-9M  
 AWS A5.20M: E491T-1C / E491T-9C / E491T-1M / E491T-9M



Megacore 71DG é um arame tubular com proteção gasosa, básico-rútílico, aplicável para soldagem em todas as posições nos processos semi automáticos e automáticos. Material de ótima soldabilidade e fácil operação por parte do soldador, desenvolvido para soldagem de materiais em aço carbono, utilizando como um gás de proteção 100% CO<sub>2</sub> ou 75% de Ar e 25% de CO<sub>2</sub>.

## Características

- ▶ **Ótima Alimentação:** Embobinamento Capa-Capa, garantindo uma perfeita alimentação de arame sem falhas durante a operação.
- ▶ **Fácil Operação:** Excelente soldabilidade fora de posição, soldadores de todos os níveis são capazes de soldar com este arame tubular devido ao fácil controle de arco e da poça de fusão, além de uma fácil remoção de escória.
- ▶ **Respingo e Fumos:** Baixos níveis de respingo e fumos metálicos.

## Aplicações Típicas

- ▶ Construção Naval
- ▶ Manutenção
- ▶ Caldeiraria
- ▶ Geração de Energia
- ▶ Offshore

## Diâmetro

- ▶ 1,2 mm
- ▶ 1,6 mm

## Condições de soldagem

- ▶ Gases de Proteção: 100% CO<sub>2</sub> / 75% de Ar e 25% de CO<sub>2</sub>
- ▶ Polaridade: DC+
- ▶ Vazão de gás: 18-25 l/min
- ▶ Extensão do arame (Stick out) = 15-20mm
- ▶ Posição de Soldagem



## Códigos dos Produtos

BRLOS71DGC1512R - ARAME TUBULAR MEGACORE 71DG 1,20MM  
 BRLOS71DGC1516R - ARAME TUBULAR MEGACORE 71DG 1,60MM

Lincoln Electric do Brasil

Av. Papa João Paulo I, 1618,  
 Cumbica - Guarulhos - São Paulo - Tel.: (11) 2431-4700  
 www.lincolnelectric.com.br

**LINCOLN**  
**ELECTRIC**

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA – Conforme AWS A5.20**

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)
AWS E71T-1M / E71T-9M / E71T-1C / E71T-9C AWS E71T1-M21A0-CS1 / E71T1-M21A2-CS1 E71T1-C1A0-CS1 / E71T1-C1A2-CS1	0,12 máx	1,75 máx	0,90 máx	0,03 máx	0,03 máx
Resultados Típicos (CS) - 100% CO <sub>2</sub>	0,04	1,30	0,40	0,01	0,01
Resultados Típicos (CS) - 75% Ar e 25% CO <sub>2</sub>	0,05	1,50	0,50	0,01	0,01

**PROPRIEDADE MECÂNICA TÍPICA – Conforme AWS A5.20**

	Escoamento (MPa)	Resistência (Mpa)	Alongamento (%)	Impacto -20°C (J)	Impacto -30°C (J)
AWS E71T-1M / E71T-9M / E71T-1C / E71T-9C AWS E71T1-M21A0-CS1 / E71T1-M21A2-CS1 E71T1-C1A0-CS1 / E71T1-C1A2-CS1	390 min	490 - 670	22 min	27	27
Resultados Típicos (CS) - 100% CO <sub>2</sub>	480	540	28	125	110
Resultados Típicos (CS) - 75% Ar e 25% CO <sub>2</sub>	600	540	27	135	130

**PARÂMETROS**

Diâmetro - mm	Posição de Soldagem	Corrente de Soldagem (A)	Tensão de Arco (V)	Velocidade do Arame m/min - IPM	Taxa de Fusão kg/h	Taxa de Deposição kg/h	Distância Bico Peça
1,2 mm	Todas as posições	115	21,5	3,7	146	1,62	1,36
	Todas as posições	135	22	4,0	157	1,75	1,47
	Todas as posições	170	22,5	6,6	260	2,89	2,43
	Todas as posições	192	23	7,5	295	3,29	2,76
	Todas as posições	230	26	10,0	394	4,38	3,68
	Plana e Horizontal	265	28,3	12,5	492	5,48	4,60
	Plana e Horizontal	300	31	15,0	591	6,57	5,52
	Plana e Horizontal	324	31	17,4	685	7,62	6,40
1,6 mm	Todas as posições	170	24,5	4,2	165	3,17	2,65
	Todas as posições	240	26	4,9	193	3,69	3,09
	Todas as posições	260	26,5	5,8	228	4,37	3,65
	Plana e Horizontal	286	27,2	6,1	240	4,60	3,84
	Plana e Horizontal	345	28,5	8,5	335	6,41	5,35
	Plana e Horizontal	412	33	11	433	8,29	6,93
	Plana e Horizontal	425	35	12	472	9,05	7,56
	Plana e Horizontal	440	35,5	13	512	9,80	8,19

Os parâmetros apresentados foram definidos utilizando a mistura gasosa de 75% Ar + 25% CO<sub>2</sub> com uma vazão de gás de 15 a 20 l/min, para a utilização de CO<sub>2</sub> puro, recomenda-se um acréscimo de aproximadamente 2,0 V na tensão de arco e uma vazão de gás de 10 a 15 l/min para a obtenção dos melhores resultados de performance. Estes resultados são valores médios que podem variar em função da aplicação a ser desenvolvida.

**Embalagem**

- ▶ Bobinas plásticas fechadas a vácuo de 15kg .
- ▶ O material deve ser mantido na sua embalagem original e principalmente sem violação até o momento de sua utilização e ser estocado em lugares protegidos de umidade ou outras condições adversas. Esse tratamento tem como objetivo manter a integridade do produto e evitar a absorção de umidade.
- ▶ Uma vez aberta à embalagem, recomendamos que após o uso, seja acondicionado em ambiente controlado com umidade relativa até 60% e uma temperatura em média 10°C acima da ambiente.

Lincoln Electric do Brasil

Av. Papa João Paulo I, 1818,  
Cumbica – Guarulhos – São Paulo – Tel.: (11) 2431-4700  
www.lincolnelectric.com.br

**LINCOLN**  
**ELECTRIC**

ARAME TUBULAR SEM PROTEÇÃO GASOSA - AUTOPROTEGIDO (FCAW-S)

# Innershield® NR® -211-MP

Aço Carbono, Todas as Posições • AWS E71T-11

## Principais Características

- ▶ Pode ser aplicação em diversos metais de base.
- ▶ Boa soldabilidade e ótima aparência de cordão
- ▶ Fácil remoção da escória
- ▶ Rápida solidificação, auxiliando em situações onde a soldagem é feita com a técnica de oscilação

## Aplicações Típicas

- ▶ Espessura de metal de base de 7.9 mm (5/16 polegadas) a 12.7 mm (1/2 polegadas)
- ▶ Aplicações com backing de cobre
- ▶ Cilindros de propano
- ▶ Automação robótica
- ▶ Soldagem em aço de carbono galvanizado ou com revestimento de zinco

## Conformidade

AWS A5.20/A5.20M 2005	E71T-11
ASME SFA-A5.20:	E71T-11
ABS:	E71T-11*
CWB/CSA W48-06:	E491T-11-H16
DB:	EN 758 T42 Z S N 1
TUV:	EN 758 T42 Z S N 1

\*Exceto para diâmetros de 0.030 polegadas (0.8 mm) e 0.035 polegadas (0.9 mm)

## Posições de soldagem

Todas, exceto para o diâmetro de 3/32in (2.4 mm)

## Espessura Máxima para o Metal de Base

Diâmetro - in (mm)	Espessura Máxima - in (mm)
0.030 (0.8)	5/16 (7.9)
0.035 (0.9)	5/16 (7.9)
0.045 (1.1)	5/16 (7.9)
0.068 (1.7)	1/2 (12.7)
5/64 (2.0)	1/2 (12.7)
3/32 (2.4)	1/2 (12.7)

\*Exceto para diâmetros de 0.030 polegadas (0.8 mm) e 0.035 polegadas (0.9 mm)

## DIÂMETROS/EMBALAGEM

Diâmetro in (mm)	1 lb (0.5 kg) Carretel Plástico 5 lb (2.3 kg) Caixa Master	1 lb (0.5 kg) Carretel Plástico 10 lb (4.5 kg) Caixa Master	10 libras (4.5 kg) Carretel Plástico
0.030 (0.8) 0.035 (0.9) 0.045 (1.1) 0.068 (1.7) 5/64 (2.0) 3/32 (2.4)	ED031448	ED027641	ED033130 ED016354 ED016363
Diâmetro in (mm)	14 lb (6.4 kg) Bobina 56 lb (25.4 kg) Caixa Master	25 lb (11.3 kg) Carretel Metálico	50 lb (22.7 kg) Bobina
0.030 (0.8) 0.035 (0.9) 0.045 (1.1) 0.068 (1.7) 5/64 (2.0) 3/32 (2.4)	ED012506 ED012508	ED030637 ED030638 ED030641 ED030645	ED012507 ED012509 ED013869

Lincoln Electric do Brasil

Av. Papa João Paulo I, 1818,  
Cumbicás - Guarulhos - São Paulo - Tel.: (11) 2431-4700  
www.lincolnelectric.com.br**LINCOLN**  
**ELECTRIC**

ARAME TUBULAR SEM PROTEÇÃO GASOSA - AUTOPROTEGIDO (FCAW-S)

## Innershield® NR®-211 - MP (AWS E71T-11)

### PROPRIEDADES MECÂNICAS<sup>(1)</sup> – Conforme AWS A5.20/A5.20M: 2005

	Limite de Escoamento <sup>(2)</sup> MPa (ksi)	Resistência à Tração MPa (ksi)	Alongamento %	Dureza Rockwell B
Especificado - AWS E71T-11	400 (58) mín.	480-655 (70-95)	20 mín.	–
Resultados Típicos <sup>(3)</sup>	435-475 (63-69)	605-645 (88-94)	22-25	89-92

### COMPOSIÇÃO QUÍMICA<sup>(1)</sup> – Conforme AWS A5.20/A5.20M: 2005

	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Al
Especificado - AWS E71T-11	0.30 máx.	1.75 máx.	0.60 máx.	0.03 máx.	0.03 máx.	1.8 máx.
Resultados Típicos <sup>(3)</sup>	0.23-0.26	0.57-0.66	0.17-0.26	≤0.01	≤0.01	1.3-1.6

### PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS TÍPICOS

Diâmetro, Polaridade	CTWD <sup>(4)</sup> mm (in)	Veloc. Alim. do Arame m/min (in/min)	Tensão (Volts)	Corrente Aprox. (Amps)	Taxa de Consumo kg/hr (libra/h)	Taxa de Deposição kg/hr (libra/h)	Eficiência (%)
0.030 pol. (0.8 mm), DC-	13 (1/2)	1.3 (50)	13-14	30	0.2 (0.5)	0.2 (0.4)	81
		2.5 (100)	13-14	60	0.5 (1.1)	0.4 (0.8)	75
		3.8 (150)	14-15	80	0.7 (1.6)	0.6 (1.2)	78
		5.1 (200)	14-15	100	1.0 (2.1)	0.8 (1.7)	81
		6.4 (250)	15-16	130	1.2 (2.6)	1.0 (2.1)	80
		7.6 (300)	18-19	140	1.4 (3.2)	1.2 (2.6)	81
0.035 pol. (0.9 mm), DC-	13-16 (1/2-5/8)	1.3 (50)	14-15	30	0.4 (0.8)	0.3 (0.7)	81
		1.8 (70)	15-16	60	0.5 (1.2)	0.5 (1.0)	83
		2.8 (110)	16-17	115	0.7 (1.6)	0.6 (1.3)	78
		3.8 (150)	17-18	130	1.0 (2.2)	0.8 (1.7)	78
		5.1 (200)	18-19	155	1.4 (3.0)	1.1 (2.5)	84
		7.0 (275)	20-21	155	2.0 (4.4)	1.5 (3.4)	78
0.045 pol. (1.1 mm), DC-	16 (5/8)	1.8 (70)	15-16	120	0.7 (1.6)	0.5 (1.1)	69
		2.3 (90)	16-17	140	1.0 (2.2)	0.8 (1.7)	77
		2.8 (110)	17-18	160	1.2 (2.7)	1.0 (2.3)	85
		2.3 (130)	18-19	170	1.5 (3.2)	1.2 (2.7)	84
0.068 pol. (1.7 mm), DC-	19-32 (3/4-1 1/4)	1.0 (40)	15-16	125	1.0 (2.1)	0.8 (1.7)	81
		1.9 (75)	18-19	190	1.8 (4.0)	1.5 (3.4)	85
		3.3 (130)	20-21	270	3.2 (7.0)	2.8 (6.1)	88
		4.4 (175)	23-24	300	4.3 (9.4)	3.8 (8.4)	89
5/64 pol. (2.0 mm), DC-	19-32 (3/4-1 1/4)	1.3 (50)	16-17	180	1.6 (3.5)	1.3 (2.9)	83
		1.9 (75)	18-19	235	2.4 (5.3)	2.0 (4.5)	85
		3.0 (120)	20-21	290	3.8 (8.4)	3.4 (7.4)	88
		4.1 (160)	22-23	325	5.1 (11.2)	4.5 (10.0)	89
3/32 pol. (2.4 mm), DC-	19-32 (3/4-1 1/4)	1.3 (50)	16-17	245	2.3 (5.0)	1.9 (4.2)	84
		1.9 (75)	19-20	305	3.4 (7.5)	2.9 (6.4)	85
		2.5 (100)	20-21	365	4.5 (10.0)	3.9 (8.7)	87
		3.3 (130)	22-23	400	5.9 (12.9)	5.1 (11.3)	88

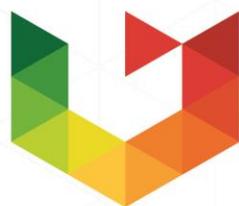
<sup>(1)</sup>Todo metal de solda típico. <sup>(2)</sup>Medido com 0.2% de desvio. <sup>(3)</sup>Ver declaração de isenção dos resultados do teste abaixo.

### RESULTADOS DO TESTE

Os resultados dos testes de propriedades mecânicas, metal depositado, composição do consumível e níveis de hidrogênio difusível foram obtidos através procedimentos de soldagem conforme normas pré-estabelecidas, e não devem ser considerados como resultados esperados de uma aplicação ou soldagem em particular. Os resultados podem variar dependendo de vários fatores, como o procedimento de soldagem, composição química do metal de base e temperatura de interpasso, tipo de junta, número de passadas e métodos de fabricação. Os usuários são aconselhados a confirmar por meio de testes de qualificação, ou outros meios apropriados, a adequação de qualquer procedimento de soldagem ou consumível utilizado antes do uso na aplicação pretendida.

Lincoln Electric do Brasil  
Av. Papa João Paulo I, 1818,  
Cumbicás – Guarulhos – São Paulo – Tel.: (11) 2431-4700  
www.lincolnelectric.com.br

**LINCOLN**  
**ELECTRIC**



# UPF

UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)