

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DA SOLDAGEM

Alexson Alves dos Santos

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONSUMÍVEL DESENVOLVIDO PARA
SOLDAGEM DE CHAPAS GALVANIZADAS ATRAVÉS DO PROCESSO GMAW**

BELO HORIZONTE

2023

Alexson Alves dos Santos

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONSUMÍVEL DESENVOLVIDO PARA
SOLDAGEM DE CHAPAS GALVANIZADAS ATRAVÉS DO PROCESSO GMAW**

Monografia apresentada ao Curso de
Especialização em Engenharia da Soldagem da
Escola de Engenharia da Universidade Federal
de Minas Gerais.

Orientador (a): Ariel Rodriguez Arias

BELO HORIZONTE

2023

S237a

Santos, Alexson Alves dos.

Avaliação do desempenho de consumível desenvolvido para Soldagem de chapas galvanizadas através do processo GMAW / Alexson Alves dos Santos. – 2023.

1 recurso online (78 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Bibliografia: f. 75-78.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica. 2. Aço de alta resistência. 3. Aço galvanizado. 4. Soldagem. 5. Zinco. I. Arias, Ariel Rodríguez.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA 10ª/2023 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 20 de dezembro de 2023, às 10:00 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONSUMÍVEL DESENVOLVIDO PARA SOLDAGEM DE CHAPAS GALVANIZADAS ATRAVÉS DO PROCESSO GMAW

Aluno: ALEXSON ALVES DOS SANTOS – Matrícula: 2021662173

Local: Remotamente via plataforma “TEAMS”.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 40 minutos, é de parecer Favorável à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 87 e com (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias.

Assinaturas:

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias

DEMEC/UFMG – Orientador

Mestre Bernardo Hermont

Barcellos Gonçalves

ESAB– Avaliador

Especialista Matheus Baptista Albertoni

ESAB– Avaliador

Aluno: Alexson Alves dos Santos

Matheus Baptista Albertoni
Especialista de Produtos - IWE
ESAB IND. E COMÉRCIO LTDA.
Mat.: 3895

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada esposa **Bárbara**, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, me dando força, apoio e carinho incondicional. Ela é a minha companheira de vida e a minha melhor amiga.

Dedico também à minha querida mãe **Maria Isabel**, que partiu deste mundo, mas que continua viva no meu coração. Ela foi a minha primeira professora, a minha inspiração e a minha heroína. Ela sempre viveu para os seus filhos e me ensinou a valorizar a educação, o trabalho e a família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, por me dar força e sabedoria para concluir este trabalho.

Agradeço à empresa ESAB, que forneceu os recursos necessários para a realização deste trabalho. Sua contribuição foi inestimável.

Quero expressar o meu especial agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias, pela sua dedicação, paciência e apoio constante durante todo o processo. Ele foi um mestre e um amigo que me ensinou muito.

Aos membros da banca examinadora, Mestre Bernardo Hermont Barcellos Gonçalves e Especialista em Soldagem Matheus Baptista Albertoni, agradeço a sua disponibilidade, esforço e valiosas contribuições.

Não posso deixar de agradecer ao meu gerente e amigo Rodrigo Sanches, e ao professor Alexandre Queiroz Bracarense, PhD, por me incentivarem a buscar o aperfeiçoamento acadêmico.

Agradeço também ao meu amigo Victor Horta Miranda pela sua ajuda, dedicação e amizade. Ele foi um parceiro fundamental para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao time da ESAB que trabalhou comigo, e em especial aos colegas de trabalho Antonio Edmar de Souza e Zaqueu Celestrino Mendes. Eles foram essenciais para o sucesso deste projeto.

Agradeço a todos os amigos do curso que compartilharam comigo essa experiência, em especial aos amigos Vinicius Martins dos Anjos e Dante Otavio Silvano Cruz.

Por último, agradeço a todo o corpo docente do curso de especialização em engenharia de soldagem da UFMG. Eles foram fundamentais para a minha formação e me transmitiram conhecimento e orientação.

RESUMO

Aços galvanizados são amplamente utilizados em aplicações industriais devido às suas propriedades anticorrosivas. A galvanização, que envolve a aplicação de uma camada de zinco no aço, protege o material contra a oxidação. No entanto, a soldagem desses materiais pode apresentar desafios, como a formação de porosidade e respingos. A otimização dos parâmetros de soldagem, configuração da junta e a seleção correta do gás de proteção podem melhorar a integridade da junta soldada. Este estudo propõe comparar o desempenho do arame Ok Aristorod 38 Zn (ER70S-G) especialmente desenvolvido para soldagem de aços galvanizados, com o arame ER70S-6 (Standard) tradicionalmente usado na indústria automotiva.

Palavras-chave: Aços galvanizados. Soldagem. Ok Aristorod 38 Zn. ER70S-G. ER70S-6. Vapor de Zinco. Aços de alta resistência.

ABSTRACT

Galvanized steels are widely used in industrial applications due to their anti-corrosive properties. Galvanization, which involves applying a layer of zinc to the steel, protects the material from oxidation. However, welding these materials can present challenges, such as the formation of porosity and spatter. The optimization of welding parameters, joint configuration, and the correct selection of shielding gas can improve the integrity of the welded joint. This study proposes to compare the performance of the Ok Aristorod 38 Zn wire (ER70S-G), specially developed for welding galvanized steels, with the ER70S-6 (Standard) wire traditionally used in the automotive industry.

Keywords: Galvanized steels. Welding. Aristorod 38 Zn. ER70S-G. ER70S-6. Zinc Vapor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama comparando a resistência e alongamento de diferentes tipos de aços, dentre eles os de alta resistência.....	16
Figura 2: Gerações de aços de alta resistência e propriedades mecânicas esperadas.	18
Figura 3: Forma de proteção da camada de zinco do processo de galvanização.....	19
Figura 4: Exemplo do processo de galvanização por imersão a quente.....	20
Figura 5: Efeito do vapor de zinco na transferência metálica.	21
Figura 6: Ilustração do processo de soldagem GMAW.	22
Figura 7: Ilustração dos equipamentos e componentes necessários para realização da soldagem GMAW.....	24
Figura 8: Roldanas em um alimentador de arame.	25
Figura 9: Ilustração de braço robótico utilizado na soldagem.	26
Figura 10: Perfil de temperaturas em um arco elétrico GMAW com transferência metálica. .	27
Figura 11 - Influência da tensão na geometria do cordão.	28
Figura 12: Evolução do vapor de zinco dentro da poça de fusão.	29
Figura 13: Influência da técnica de soldagem, “empurrando” e “puxando”, na morfologia do cordão de solda.	30
Figura 14: Relação corrente e tensão e modos de transferência esperados para o processo GMAW.....	31
Figura 15: Esquemático de modo de transferência curto-circuito.	32
Figura 16 - Esquemático de modo de transferência e comportamento da corrente no tempo. .	34
Figura 17: Modo de calcular o aporte de calor (<i>heat input</i>)......	35
Figura 18: Esquemático da junta soldada.....	36
Figura 19: Influência do gás de proteção na morfologia do cordão de solda.....	37
Figura 20: Tipos de junta.	39
Figura 21: Tipos de junta de topo.	40
Figura 22: Juntas de ângulo.....	40
Figura 23: Exemplo de junta sobreposta.	41

Figura 24: Defeitos em soldagem conforme IIW.	42
Figura 25: Defeitos exemplificados pela ISO 6520-1.....	43
Figura 26: Exemplos de trincas no centro do cordão (a) trinca superficial observada de cima em um cordão TIG em aço inoxidável e (b) trinca interna em uma solda unindo peças de aços de baixo e médio teores de carbono.	45
Figura 27: Esquema dos tipos de distribuição de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada e (c) alinhada (radiografia esquemática)	46
Figura 28: Respingos em solda.....	46
Figura 29: Exemplo esquemático de mordedura.	47
Figura 30: Representação esquemática de uma junta sobreposta e sua avaliação visual e dimensional.....	48
Figura 31: Esquema de gabarito para a determinação da dimensão de soldas de filete.	49
Figura 32: Inspeção Radiográfica.	51
Figura 33 : Macrografia de junta sobreposta soldada através do processo MIG/MAG.....	51
Figura 34: Tela do software do equipamento de ensaio de tração com gráfico Força x Deslocamento.	52
Figura 35: Exemplo dos componentes e equipamentos utilizados para realização da soldagem.	54
Figura 36: Montagem da junta soldada	57
Figura 37: Foto da junta real antes de ser soldada presa no dispositivo de fixação	58
Figura 38: Ângulos envolvidos na soldagem	59
Figura 39: Padrão de escala filmes radiográficos	60
Figura 40: Exemplo de medição de poros em filme radiográfico	60
Figura 41: Detalhe de qualidade radiográfica nos filmes digitalizados	61
Figura 42: Corpo de prova de tração transversal retirado da chapa soldada.....	62
Figura 43: Quantificação dos poros em filmes radiográficos com qualidade satisfatória.	63
Figura 44: CP-02 ER70S-6 – pulsado.....	64
Figura 45: CP-07 ER70S-G – pulsado.....	65
Figura 46: CP-09 ER70S-6 – Curto-Circuito	65
Figura 47: CP-11 ER70S-G – Curto-Circuito	65

Figura 48: Medição linear da ZTA, CP02 – Medição aproximada por 50% do comprimento total	66
Figura 49: Gráfico de resultados dos ensaios de tração para o modo de transferência Curto-Circuito.....	68
Figura 50: Gráfico de resultados dos ensaios de tração para o modo de transferência pulsado	69
Figura 51: Região fraturada dos corpos de prova.	70
Figura 52: Corpos de prova fraturados, com foco na região de fratura (Pulsado)	70
Figura 53: Corpos de prova fraturados, com foco na região de fratura (Curto Circuito)	71
Figura 54: Avaliação juntas soldadas	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades dos gases utilizados na soldagem.	38
Tabela 2: Comportamento químico e aplicação dos gases de solda.	38
Tabela 3: Limites para imperfeições.....	44
Tabela 4: Limites para imperfeições em soldas, segundo ISO 5817.....	45
Tabela 5: Limite para quantidade de respingo segundo ISO 5817.....	47
Tabela 6: Limite para tamanho de mordedura segundo ISO 5817.....	47
Tabela 7: Ensaio sugeridos para detecção de imperfeições na solda.	50
Tabela 8: Propriedades mecânicas especificada pela AWS - ASME BPVC.II.C SFA-5.18 ...	55
Tabela 9: Propriedades mecânicas típicas segundo o fabricante*.....	56
Tabela 10: Composição química especificada pela AWS - ASME BPVC.II.C SFA-5.18.....	56
Tabela 11: Faixa de composição química de controle segundo o fabricante.....	57
Tabela 12: Relação de identificação dos corpos de prova.	63
Tabela 13: Resultado da quantificação de poros.	64
Tabela 14: Resultado do ensaio de tração transversal.	67
Tabela 15: Análise qualitativa dos resultados de soldagem em cada cenário proposto.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Chapas alta resistência	15
2.2 Galvanização	19
2.3 Impacto da galvanização na soldagem	20
2.4 Soldagem GMAW	22
2.4.1 Seleção do consumível de soldagem	23
2.4.2 Equipamento	23
2.4.3 Fonte	24
2.4.4 Alimentador	25
2.4.5 Braço robótico	25
2.4.6 Arco elétrico.....	26
2.4.7 Variáveis do processo	27
2.4.7.1 Tensão.....	28
2.4.7.2 Velocidade de soldagem	28
2.4.7.3 Ângulo da tocha	29
2.4.8 Modo de transferência	30
2.4.8.1 Curto-Circuito	32
2.4.8.2 Pulsado	33
2.4.9 Heat input.....	34
2.4.10 Regiões da solda.....	35
2.4.11 Proteção gasosa	37
2.4.12 Junta soldada	39
2.4.12.1 Junta sobreposta	41
2.4.13 Descontinuidades.....	42
2.4.13.1 Falta de fusão	43
2.4.13.2 Trinca de solidificação.....	44
2.4.13.3 Porosidade.....	45

2.4.13.4 Respingos	46
2.4.13.5 Mordedura.....	47
2.4.14 Ensaio de integridade	48
2.4.14.1 Ensaio visual	48
2.4.14.2 Radiografia.....	49
2.4.14.3 Macrografia	51
2.4.14.4 Ensaio de tração.....	52
3 METODOLOGIA	53
3.1 Equipamento.....	53
3.2 Metal de base.....	55
3.3 Metais de adição.....	55
3.4 Montagem	57
3.5 Processo de soldagem.....	58
3.6 Ensaio 60	
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 Resultado radiografia	63
4.2 Resultado Macrografia	64
4.3 Resultado de tração	67
4.4 Análise dos resultados.....	72
5 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Aplicações industriais em aço são amplamente utilizadas devido à suas propriedades mecânicas, entretanto a deterioração deste material devido a oxidação representa um desafio a ser superado. Os aços galvanizados são uma solução mais econômica quando comparada à utilização de ligas nobres, como aços inoxidáveis. Estes são utilizados em diversas aplicações, como construção civil, indústria automotiva, eletrodomésticos, entre outras.

A galvanização consiste na aplicação de uma camada de zinco ou liga de zinco sobre a superfície do aço, que pode ser feita por imersão a quente, por eletrodeposição, ou por outros métodos como galvanização por aspersão térmica, galvanização a fogo, galvanização a vapor, galvanização por centrifugação, entre outros, dependendo das características específicas da peça e das exigências do ambiente em que será utilizada. O zinco forma uma camada de revestimento que evita a corrosão do substrato metálico e atua concomitantemente como anodo de sacrifício, de forma que, mesmo se a superfície do substrato for exposta à atmosfera, a camada de zinco remanescente atuará protegendo da oxidação (EASAB, 2023).

Uma das técnicas mais empregadas na fabricação de componentes e estruturas em aços galvanizados é a soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding), que utiliza um arame consumível e um gás de proteção para formar o arco elétrico e fundir o metal base. Esse processo oferece vantagens como alta produtividade, baixo custo e facilidade de operação (MARQUES, 2005)

No entanto, a soldagem destes materiais apresenta alguns desafios relativos à integridade da junta soldada, como a formação de porosidade, respingos, queima do revestimento de zinco, trincas e falta de fusão. Esses podem comprometer a qualidade e a durabilidade das uniões soldadas.

A principal causa desses defeitos está relacionada ao ponto de fusão e vaporização do zinco, que são aproximadamente 419°C e 907°C, respectivamente. O vapor do zinco presente durante o processo de soldagem, dentro e no entorno da poça de fusão, afeta a estabilidade do arco elétrico contribuindo para a geração de respingos, e podendo ocasionar o aprisionamento do vapor de zinco na poça de fusão ocasionando porosidade (JOSEPH, 2003)

Problemas com fumos durante a soldagem também são observados, o zinco presente no revestimento se volatiliza formando óxido de zinco, composto de aparência branca, que quando

inalado em grandes quantidades pode causar febre e irritação das vias respiratórias (HAO, 2002; DALTRO, 2000).

A otimização dos parâmetros de soldagem, bem como a utilização de correntes controladas como pulsado (GMAW-P), transferências a frio e corrente alternada (AC) controlada são alternativas utilizadas industrialmente para reduzir a quantidade de respingos, porosidade e ZTA. Além disso, a redução da velocidade de soldagem apresenta efeito positivo na redução da porosidade, este aspecto está relacionado à dinâmica de formação e liberação das bolhas de vapor de zinco geradas durante o processo de soldagem (JOSEPH, 2003; NARAYANAN, 2014)

A seleção correta do gás de proteção também apresenta resultados satisfatórios em relação à integridade da junta soldada, a utilização de gás 80% Argônio + 20% CO₂ apresenta um resultado satisfatório em relação à formação de ilhas de sílica e a presença de CO₂ reduz a porosidade, através da reação de oxidação do zinco, entretanto a utilização de 100% CO₂ acarreta a formação demasiada de ilhas de sílica, aprisionando o vapor de zinco no interior do cordão (EASAB,2023)

A presente monografia propõe um estudo do desempenho do arame OK Aristorod 38 Zn (ER70S-G), desenvolvido pela ESAB, em comparação ao arame de uso tradicional na indústria automotiva, o ER70S-6. Serão avaliados aspectos como a presença de porosidade no cordão de solda, influência do arame na morfologia do cordão de solda, propriedades mecânicas e comportamento do arame quando da utilização de corrente pulsada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

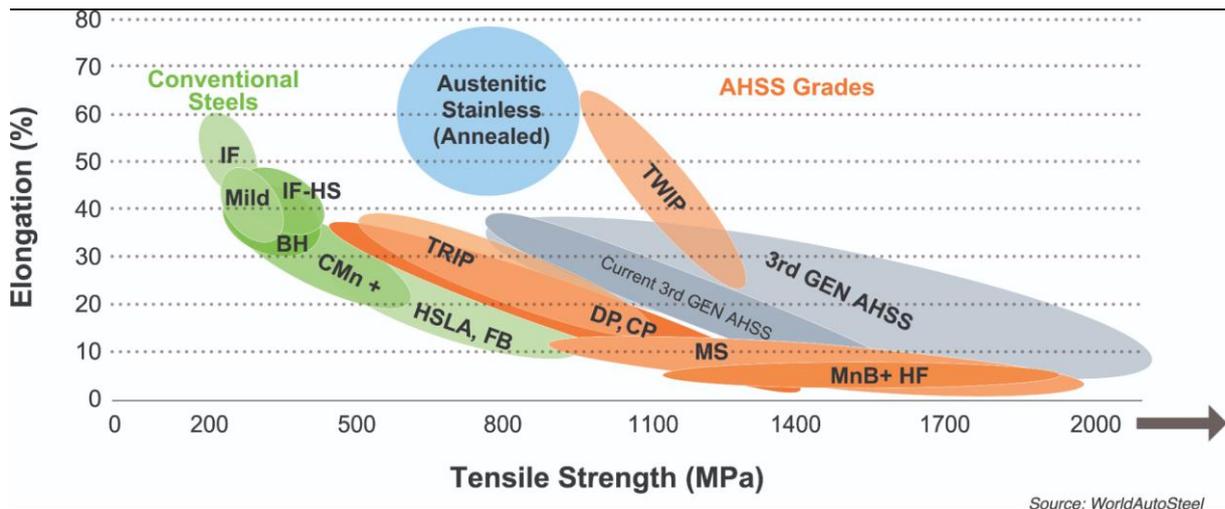
2.1 Chapas alta resistência

Os aços de alta resistência são materiais que se destacam por suas propriedades mecânicas, como resistência, durabilidade e ductilidade. Eles são obtidos por processos que modificam a estrutura e a composição do aço, com a adição de elementos de liga e o controle do tamanho de grão.

Os aços de alta resistência podem ser classificados de acordo com sua resistência e sua capacidade de endurecimento. Eles também podem ser classificados de forma geral como aços

HSLA (alta resistência e baixa liga) e aços AHSS (aços avançados de alta resistência), ambos com resistência mínima de 440 Mpa (64 ksi ou 64.000 psi), sendo diferenciados por sua microestrutura. A Figura 1 apresenta um diagrama que demonstra as propriedades mecânicas desses aços comparados a outros disponíveis no mercado.

Figura 1: Diagrama comparando a resistência e alongamento de diferentes tipos de aços, dentre eles os de alta resistência.



Fonte: WORLDAUTOSTEEL (2023)

Aços HSLA são aços ferríticos monofásicos, com teor de carbono abaixo de 0,2%, e microligados com pequenas porcentagens de elementos de liga, como manganês, silício, nióbio, vanádio, cromo, molibdênio, titânio etc., que formam precipitados finos na matriz ferrítica, aumentando sua resistência e tenacidade. Esses aços têm boa soldabilidade e capacidade de dobra, podendo ser usados em aplicações do setor automotivo como chassis, mecanismos de assento, sistemas de suspensão e rodas.

Os aços AHSS são aços que apresentam uma microestrutura multifásica, podendo conter várias fases, como ferrita, martensita, bainita e austenita, que conferem propriedades mecânicas especiais. Alguns aços AHSS endurecem mais ao deformar, melhorando sua resistência e sua ductilidade. Outros aços AHSS são muito resistentes e duros e se beneficiam do cozimento. Eles podem ser obtidos por diferentes processos, como laminação a quente, laminação a frio, recozimento intercrítico ou tratamento térmico pós-conformação. Existem diferentes tipos de aços AHSS, como os aços bifásicos, os aços TRIP, os aços TWIP e os aços ferrita-bainita.

Os aços bifásicos são aços AHSS que têm uma microestrutura composta por ferrita e martensita. A martensita, que pode chegar a 15% do volume, é responsável pela alta resistência, enquanto a ferrita, que forma uma matriz contínua, é responsável pela boa ductilidade. Eles são

obtidos por um processo de laminação a quente seguido de um resfriamento rápido, que provoca a transformação da austenita em martensita. Eles podem ser usados em aplicações como portas, capôs, tetos e painéis.

Os aços TWIP são aços AHSS que têm uma microestrutura composta por ferrita e austenita. A austenita, que pode chegar a 40% do volume, é responsável pela excepcional ductilidade, devido ao efeito TWIP, que consiste na formação de maclas de deformação na austenita durante a deformação plástica. A ferrita, que forma uma matriz contínua, é responsável pela alta resistência. Eles são obtidos por um processo de laminação a frio seguido de um recozimento, que permite a obtenção de uma microestrutura com uma alta fração de austenita. Eles podem ser usados em aplicações como painéis externos, portas e capôs.

Os aços ferrita-bainita são aços AHSS que têm uma microestrutura composta por ferrita e bainita. A bainita, que pode chegar a 40% do volume, é responsável pela alta resistência, enquanto a ferrita, que forma uma matriz contínua, é responsável pela boa ductilidade. Eles são obtidos por um processo de laminação a quente seguido de um resfriamento controlado, que permite a formação de uma microestrutura ferrita-bainita. Eles podem ser usados em aplicações como vigas e travessas, reforços e outros componentes estruturais.

Os aços de primeira geração (1G), ilustrados na Figura 2, são bem estabelecidos no mercado, oferecendo uma combinação eficaz de resistência e ductilidade, além de serem facilmente soldáveis e conformáveis. Em contraste, os aços de segunda geração (2G) se destacam por sua resistência superior e ductilidade excepcional, atribuídas à presença de austenita em sua microestrutura. Contudo, esses aços têm desvantagens como custo elevado, estabilidade térmica reduzida e dificuldades na soldagem. Por fim, os aços de terceira geração (3G), os mais novos do mercado, foram desenvolvidos para superar as limitações dos aços de 2G, mantendo ou até melhorando suas propriedades. Esses aços possuem microestruturas multifásicas, com austenita retida em uma matriz de ferrita, bainita ou martensita, e exibem uma alta capacidade de encruamento, resultando em resistência e ductilidade notáveis.

Figura 2: Gerações de aços de alta resistência e propriedades mecânicas esperadas.

Geração	Tipo de aço	Microestrutura	Resistência à tração (MPa)
1ª	DP (Dual Phase)	Ferrita + Martensita	440 - 800
	TRIP (Transformation Induced Plasticity)	Ferrita + Bainita + Austenita Retida	590 - 800
	CP (Complex Phase)	Ferrita + Martensita + Bainita	800 - 1200
	MS (Martensitic)	Martensita	900 - 1700
	PHS (Press Hardening Steel)	Martensita	900 - 2000
2ª	TWIP (Twinning Induced Plasticity)	Austenita	980 - 1200
3ª	Q&P (Quenching and Partitioning)	Ferrita + Martensita + Austenita Retida	980 - 1200
	TBF (Tempered Bainitic Ferrite)	Ferrita + Bainita	980 - 1200
	GF (Gen 3 Ferrite)	Ferrita	980 - 1200

Fonte: MAXWELL (2023)

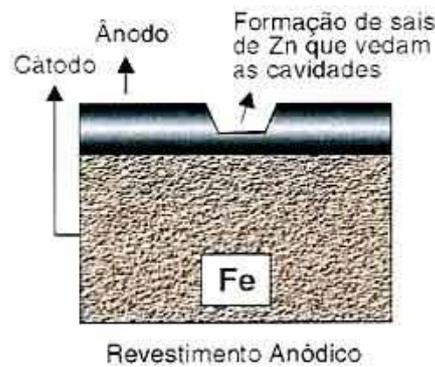
Existem várias maneiras de classificar os aços de alta resistência. Por exemplo, a WorldAutoSteel (2023) tem uma classificação, mas também existem outras como a da SAE International, que usa o termo AHSS (Advanced High-Strength Steel) para se referir aos aços com resistência à tração acima de 550 MPa, e UHSS (Ultra High-Strength Steel) para os aços com resistência à tração acima de 1000 MPa. A ABNT, por sua vez, usa o termo AHS (Aço de Alta Resistência) para os aços com limite de escoamento acima de 210 MPa, e AHS-MP (Aço de Alta Resistência Multiphase) para os aços com microestrutura multifásica e limite de escoamento acima de 340 MPa.

Os aços de alta resistência são extremamente valiosos para a indústria automotiva, pois possibilitam a produção de componentes mais leves, duráveis e seguros. Isso contribui para a diminuição da emissão de gases poluentes e aumenta a competitividade das fabricantes de automóveis. Contudo, esses aços também trazem alguns desafios, como a necessidade de novas tecnologias de processamento, moldagem, soldagem e revestimento, o que exige investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

2.2 Galvanização

A galvanização é uma técnica de revestimento metálico que utiliza o zinco ou suas ligas como material de proteção. O zinco é depositado sobre a superfície de uma chapa de aço por meio de processos físicos ou químicos, conferindo ao substrato uma maior resistência à corrosão. O zinco pode desempenhar duas funções distintas: criar uma barreira física que impede o contato do aço com o meio corrosivo, de forma semelhante a proteção através de tintas industriais, também pode oferecer proteção catódica, que consiste na oxidação preferencial do zinco em relação ao aço, caso haja algum defeito no revestimento, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3: Forma de proteção da camada de zinco do processo de galvanização.



Fonte: ICZ (2023)

Galvanização por imersão a quente (*Hot Dip Galvanizing*), conforme mostrado na figura 4, é um processo de revestimento de aço com zinco ou suas ligas, que oferece alta resistência e durabilidade. As peças de aço são submetidas a altas temperaturas em um recipiente com zinco derretido, que se fixa à superfície metálica, formando várias camadas de liga de zinco ao aço. Esse método de galvanização é muito utilizado em peças de grande porte, em ambientes abertos e expostos a intemperes ou corrosivos, como na construção civil e na agricultura.

Figura 4: Exemplo do processo de galvanização por imersão a quente.



Fonte: ICZ (2023)

Galvanização eletrolítica: é um método de revestimento de aço com zinco, que utiliza uma corrente elétrica para depositar uma camada fina e uniforme de zinco sobre o metal, em uma solução iônica de zinco. As peças de aço são ligadas ao polo positivo do circuito elétrico, que atrai os íons de zinco da solução para a superfície metálica. Esse processo de galvanização é mais econômico e estético, pois produz um acabamento brilhante e regular. Esse tipo de galvanização é recomendado para peças de pequeno porte ou que serão usadas em ambientes internos.

Galvanização a frio: é uma forma de evitar a corrosão do aço, que usa uma tinta rica em zinco para cobrir o metal, com pincéis, pistolas ou sprays. A tinta cria uma camada de zinco, que se une ao ferro por meio de uma reação química e bloqueia o acesso do aço ao oxigênio e à umidade. Esse processo de galvanização é fácil e flexível, pois pode ser realizado em qualquer situação e em qualquer peça. Esse processo de galvanização é indicado para consertos, manutenção ou peças que não exigem uma alta proteção contra a corrosão.

2.3 Impacto da galvanização na soldagem

A camada de zinco que protege o aço contra a corrosão, pode trazer dificuldades técnicas na soldagem, pois pode gerar vários defeitos e discontinuidades no cordão de solda como porosidade e respingos e outros.

O Zinco (Zn) possui ponto de fusão mais baixo que aço, e libera gases durante o processo de soldagem. Esses gases podem ficar aprisionados dentro e ao redor da solda, criando bolhas ou cavidades que comprometem a resistência e a qualidade do metal de solda.

Além disso, o vapor de zinco pode interferir na estabilidade do arco, gerando bolsões de vapor (Zn) conforme ilustrado na Figura 5 aumentando a quantidade de respingo consideravelmente. Para evitar esses problemas, é preciso soldar de forma a permitir que o vapor de zinco escape da poça de fusão.

Figura 5: Efeito do vapor de zinco na transferência metálica.



Fonte: ESAB (2023)

Para evitar ou minimizar esses efeitos indesejáveis, é preciso adotar algumas medidas preventivas e corretivas, tais como:

- Projetar juntas com uma abertura suficiente para permitir que o zinco se difunda e escape da poça de fusão, evitando a formação de poros.
- Utilizar um ângulo de soldagem específico, que ajude a eliminar o gás de zinco e a reduzir a queima da camada no lado oposto da chapa. O ângulo ideal é de 20 a 40° no sentido empurrando, com a tocha com ângulo de 25°.
- Preferir uma posição de soldagem horizontal, onde o gás de zinco pode escapar mais facilmente pela ação da gravidade. Se for necessário soldar em outras posições, é preciso ajustar os parâmetros de soldagem e usar uma técnica adequada para evitar a porosidade.

- Reduzir a velocidade de soldagem, dando ao zinco mais tempo para escapar antes que a solidificação ocorra. A velocidade ideal varia de acordo com a espessura da chapa, mas geralmente é menor do que a usada para soldar chapas sem revestimento
- Usar preferencialmente a transferência pulsada, que pode controlar melhor a poça de fusão e ajudar o zinco a escapar.
- Misturar gases de proteção com 80% de argônio e 20% de dióxido de carbono, para reduzir a porosidade e melhorar a estabilidade do arco. Essa mistura também pode diminuir os respingos e a queima da camada de zinco (EASAB, 2023).

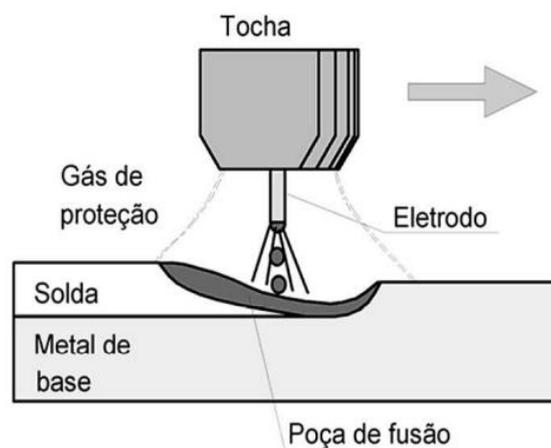
2.4 Soldagem GMAW

O processo de soldagem a arco com gás de proteção (GMAW, do inglês Gas Metal Arc Welding), também conhecido no Brasil como MIG-MAG (Metal Inert Gas – Metal Active Gas), consiste na geração de calor por meio de um arco elétrico. Esse arco elétrico é formado entre a extremidade de um eletrodo de arame consumível, que é fornecido de forma contínua, e a peça a ser soldada.

Neste processo, podem ser empregados gases inertes ou ativos, mas quando se trata de soldagem de alumínio e suas ligas, o processo se limita aos gases inertes, podendo ser denominado como MIG. O gás de proteção tem a função de possibilitar a formação do arco elétrico através de sua ionização, bem como de proteger o metal fundido da contaminação pelos gases da atmosfera, este processo está ilustrado na (MARQUES, 2005).

Figura 6 (MARQUES, 2005).

Figura 6: Ilustração do processo de soldagem GMAW.



Fonte: BRACARENSE (2003)

A partir do movimento da tocha de soldagem em relação a peça, a poça de fusão é conduzida de forma a preencher a região desejada e se solidifica quando atinge a temperatura de solidificação do metal, formando o cordão de solda. (Fortes Cleber, 2005)

O processo de soldagem a arco GMAW é um dos mais empregados atualmente, devido à sua versatilidade, possibilidade de soldagem em todas as posições, capacidade de união de chapas finas e boa qualidade da soldagem nos passes de raiz. Com o controle adequado da energia de soldagem, é possível obter três modos de transferência do metal: curto-circuito, globular e spray (SANTOS, T. F.; MODENESI, P. J.; GOMES, R. M.; BRACARENSE, 2006)

2.4.1 Seleção do consumível de soldagem

Para a realização do procedimento de soldagem, é crucial realizar a seleção apropriada de consumíveis para garantir um resultado satisfatório. Embora seja recomendado o uso de consumíveis com resistência mais baixa que a do metal de base para a soldagem de aços de alta resistência, esse conceito específico é conhecido como undermatching. É importante ressaltar que nem toda soldagem de aço de alta resistência necessariamente emprega o conceito de undermatching.

A utilização de consumíveis com menor limite de resistência trazem vantagens para o metal de solda como, aumento da tenacidade do metal de solda, menores níveis de tensão residual e redução da probabilidade de ocorrência de trinca por hidrogênio (desde que o consumível possua baixo nível de hidrogênio (AÇOS BIFÁSICOS, 2023)

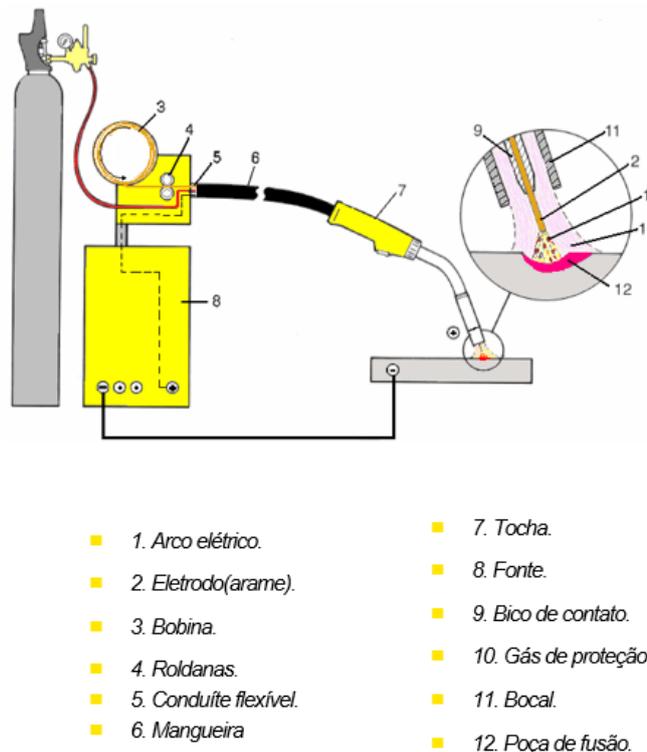
Este estudo de caso parte da prática da indústria automotiva na soldagem GMAW de componentes que utilizam o ER70S-6 como consumível para soldagem de chapas de alta resistência galvanizadas, deste modo, a proposta de alteração do consumível tem como objetivo a redução de porosidade e consequente retrabalho.

2.4.2 Equipamento

O processo de soldagem requer a utilização de alguns equipamentos e componentes que possibilitarão a abertura e controle do arco elétrico. Para o caso do processo GMAW,

considerado um processo semiautomático, é também necessário o alimentador de arame, que irá manter a alimentação contínua do consumível. Os componentes principais, mostrados na Figura 7, serão listados e detalhados nos tópicos a seguir (MODENESI, 2009)

Figura 7: Ilustração dos equipamentos e componentes necessários para realização da soldagem GMAW.



Fonte: ESAB (2023)

2.4.3 Fonte

A fonte no processo de soldagem é a responsável pela transformação da energia elétrica da rede para fornecimento de energia para o processo, estas devem ser capazes de elevar e reduzir a corrente elétrica e controlar a saída de tensão.

No decorrer dos anos foram desenvolvidos inúmeros tipos de fontes de soldagem, como geradores, retificadores e inversores. A forma como estes equipamentos transformam a corrente da rede e disponibilizam para o processo de soldagem, a velocidade de resposta quando da variação do arco elétrico estão ligadas à tecnologia do equipamento (RODRIGUES, 2022).

As fontes de soldagem inversoras representam uma evolução significativa na tecnologia de soldagem, apresentando características distintas que as diferenciam das fontes

convencionais. Em uma fonte inversora a corrente da rede é transformada e retificada em alta frequência (5000 a 200.000 Hz).

Além disso esses equipamentos tem a capacidade de fornecer corrente contínua pulsada, o que permite maior controle sobre o processo de soldagem, resultando em arcos mais estáveis e menor respingo (MODENESI, 2009)

2.4.4 Alimentador

O sistema de alimentação de arame, também conhecido como alimentador, possui a função de controlar e manter estável a quantidade de arame que passa pela tocha. Este sistema é composto por roldanas, conforme

Figura 8, que tracionam o arame a partir de uma bobina ou barrica e o empurram através da tocha até que este seja energizado ao passar pelo bico de contato e fundido pelo arco elétrico. Em um processo parametrizado e estável a taxa de fusão gerada pelo arco elétrico é igual à velocidade de alimentação gerada pelo alimentador.

Figura 8: Roldanas em um alimentador de arame.



Fonte: Próprio autor (2023)

2.4.5 Braço robótico

Nos processos convencionais de soldagem GMAW, a tocha é movimentada pelo soldador. Essa movimentação pode passar por variações de velocidade, altura, ângulo da tocha e o equipamento realiza as compensações nas características elétricas para manter o processo o

mais estável possível. O braço robótico por sua vez irá manter conforme programado a velocidade, altura, ângulo e demais características relativas ao movimento da tocha durante todo o processo.

Desta forma, com a utilização de um manipulador robótico, como o ilustrado na Figura 9, é possível padronizar a execução de peças soldadas, desde que haja preparação adequada da junta, uma vez que o programa não irá compensar desvios na junta, como o soldador poderia fazer.

Figura 9: Ilustração de braço robótico utilizado na soldagem.



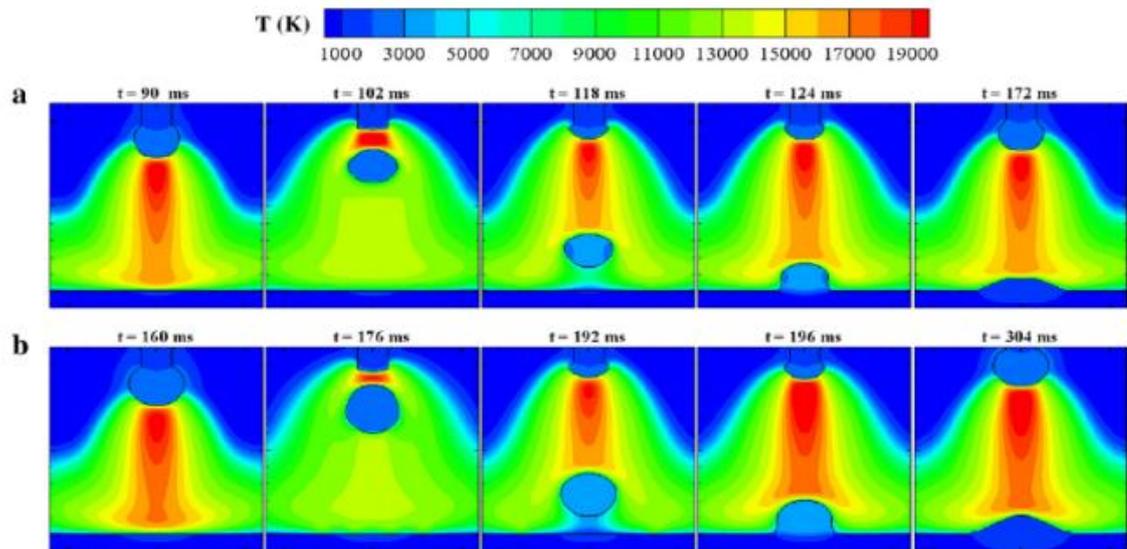
Fonte: ESAB (2023)

2.4.6 Arco elétrico

O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem de materiais metálicos, esta nada mais é do que uma descarga elétrica controlada que se forma a partir da diferença de potencial gerada pela fonte de soldagem e em um meio ionizável. A corrente elétrica passa através do eletrodo do processo em direção à peça de trabalho, através de um gás ionizado, desta forma o arco elétrico se apresenta em forma de plasma.

Este apresenta características desejáveis para o processo de soldagem incluindo a concentração de energia para a fusão em uma pequena área do metal base, altas temperaturas como mostrado na Figura 10, equipamento com custo acessível e fácil controle e parametrização (MODENESI, 2001)

Figura 10: Perfil de temperaturas em um arco elétrico GMAW com transferência metálica.



Fonte: RODRIGUES (2022)

Através das características elétricas da fonte de soldagem, é possível alterar a forma com a qual o arco elétrico se comporta e conseqüentemente alterar o resultado no cordão de solda. Este fato é fundamental para a versatilidade dos processos de soldagem a arco.

2.4.7 Variáveis do processo

Há diversas variáveis no processo de soldagem que exercem impacto significativo no comportamento do arco elétrico e, conseqüentemente, nos resultados da soldagem. Tãmanha é a influência dessas variáveis que as diversas normas de fabricação por soldagem preveem limites específicos para a variação desses parâmetros dentro de um processo qualificado.

2.4.8 Corrente

A corrente é a variável que é diretamente proporcional a taxa de fusão do consumível e ao calor imposto sobre a peça, quanto maior a corrente maior será a entrega térmica do processo. Além disso a corrente está diretamente relacionada ao modo de transferência do metal de solda, e conseqüentemente, à estabilidade do processo.

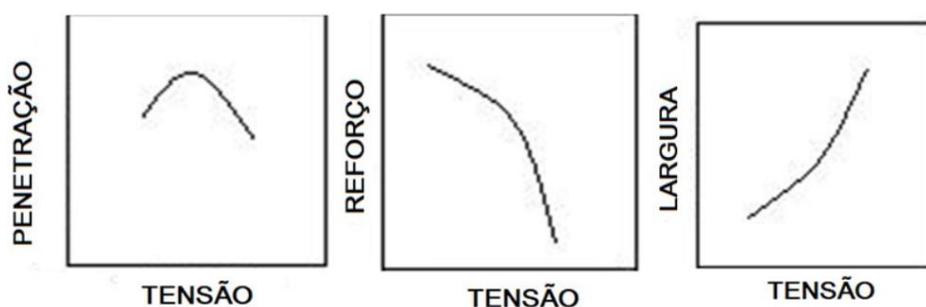
2.4.7.1 Tensão

A tensão, medida em Volts (V) possui influência direta no modo de transferência metálica do processo e, portanto, influencia a estabilidade do processo, quantidade de respingos e quantidade de gases absorvidos pelo arco elétrico. Além disso, a tensão é diretamente proporcional ao comprimento e largura do arco elétrico e ao aporte de calor do processo.

Apesar de ser diretamente proporcional ao aporte de calor, uma vez que há também o aumento da altura e largura do arco, e conseqüentemente aumento da área de atuação do arco elétrico, pode-se haver um aumento da tensão em um processo, sem que haja um aumento da penetração alcançada, uma vez que a energia por área por área possa ser menor, conforme

Figura 11 (BRACARENSE, 2003).

Figura 11 - Influência da tensão na geometria do cordão.



Fonte: BRACARENSE (2003)

2.4.7.2 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é a velocidade na qual a tocha se move em relação à peça, esta usualmente é medida em “cm/min” ou “mm/s”. Este parâmetro é inversamente

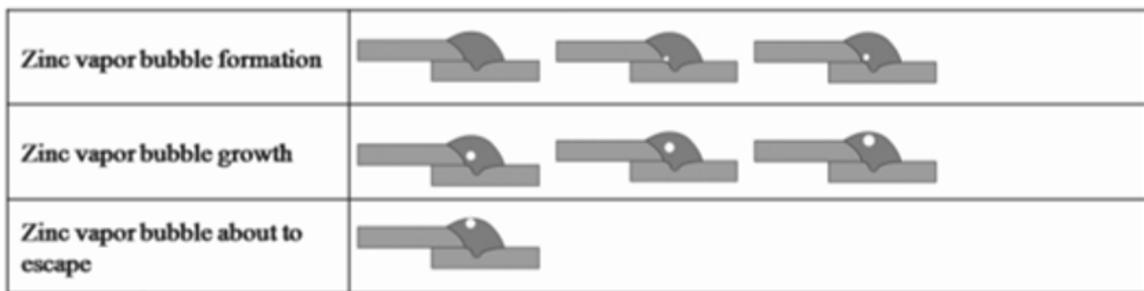
proporcional ao aporte de calor, porém, assim como ocorre com a tensão, o aumento da velocidade de soldagem não é inversamente proporcional a penetração alcançada, uma vez que existem outros fenômenos envolvidos no processo.

Além disso, a velocidade de soldagem está relacionada ao tempo de solidificação da poça de fusão, e conseqüentemente está relacionada à quantidade de porosidade. Conforme badri, a redução da velocidade de soldagem de aproximadamente 22 mm/s para 16 mm/s representa uma redução de até 4% na porosidade total de uma junta soldada.

Esse fato está relacionado à dinâmica de formação de poros, como por exemplo na soldagem de aços galvanizados, vide (ESAB, 2023).

Figura 12. Durante a soldagem a queima do zinco gera vapor que fica dentro da poça de fusão, caso o tempo para escape do vapor de zinco não seja suficiente, este ficará aprisionado em forma de poro no metal sólido (ESAB, 2023).

Figura 12: Evolução do vapor de zinco dentro da poça de fusão.



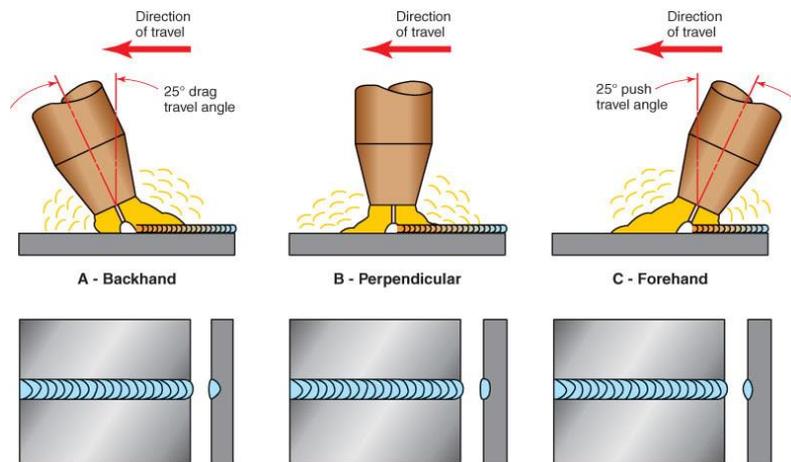
Fonte: ESAB (2023)

2.4.7.3 Ângulo da tocha

O ângulo da tocha está relacionado diretamente à morfologia do cordão, uma vez que controla a posição no qual o metal será depositado, o modo como a poça de fusão é conduzida e a forma que ocorre o fluxo de gás de proteção na peça.

O ângulo da tocha também está relacionado à direção do movimento, conforme Figura 13, caso a ponta do arame esteja inclinada na direção do movimento, este tipo de soldagem é denominada “empurrando”, caso contrário é denominada “puxando”.

Figura 13: Influência da técnica de soldagem, “empurrando” e “puxando”, na morfologia do cordão de solda.



Fonte: HALVERSON CTS (2023)

Para o caso específico da soldagem de aços galvanizados, a técnica “empurrando” é mais adequada, pois facilita a eliminação do vapor de zinco. O gás de proteção ajuda a expulsar o vapor de zinco. Além disso um de ângulo de 20 a 40° no sentido empurrando ajuda a eliminar o vapor (ZN) gerado pela queima do zinco e melhora o aspecto do cordão (ESAB, 2023).

2.4.8 Modo de transferência

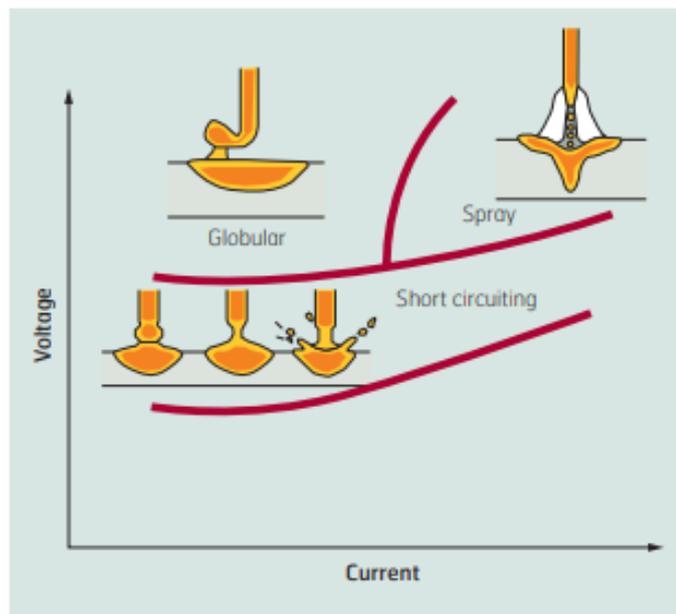
Na soldagem GMAW, o metal de adição é transferido do eletrodo consumível para a peça de trabalho por meio de diferentes modos de transferência metálica, que são classificados em: curto-circuito, globular e spray. Existe também o modo pulsado, que é uma modificação do modo spray, onde a corrente é alternada entre valores baixos e altos, permitindo um melhor controle da transferência. Cada modo de transferência possui aspectos distintos, benefícios e desafios, que devem ser analisados na seleção do modo mais apropriado para cada caso de

soldagem, considerando o tipo de material, a espessura, o formato da junta e a finalidade da solda.

O modo de transferência globular ocorre quando o eletrodo se funde em gotas grandes e irregulares, que são transferidas pela força da gravidade. A transferência é realizada com altas correntes e tensões. A transferência globular permite uma alta taxa de deposição, mas também gera muitos respingos e pode causar porosidade ou falta de penetração. As posições de soldagem são limitadas à posição plana ou horizontal.

O modo de transferência spray ocorre quando o eletrodo se funde em gotas pequenas e regulares, que são transferidas pelo jato de gás de proteção. Esse modo de transferência é usado com altas correntes e tensões. A transferência spray permite uma alta penetração, uma boa geometria e uma boa qualidade do cordão de solda, com poucos respingos e porosidade. A Figura 14 mostra de forma resumida qual a relação aproximada de parâmetros para se alcançar cada modo de transferência.

Figura 14: Relação corrente e tensão e modos de transferência esperados para o processo GMAW



Fonte: WEMAN (2006)

O modo de transferência pulsado ocorre quando a corrente de soldagem é alternada entre um valor alto e um valor baixo, de forma a transferir uma gota por pulso. Esse modo de transferência é usado com correntes médias e altas. A transferência pulsado permite uma maior estabilidade do arco, uma menor geração de calor, uma menor distorção e uma maior

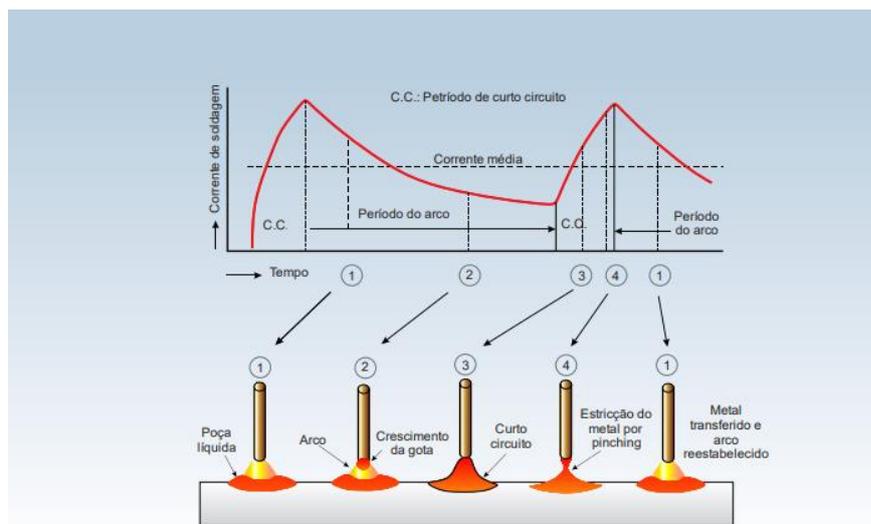
possibilidade de soldagem em diferentes posições. No entanto é necessário um equipamento especial e um controle preciso dos parâmetros de soldagem.

2.4.8.1 Curto-Circuito

A soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) por curto-circuito é uma técnica que consiste na transferência do metal de adição do arame consumível para a peça apenas quando há contato entre eles, gerando um curto-circuito. Esse fenômeno se repete de 20 a 200 vezes por segundo, dependendo dos parâmetros de soldagem, e provoca a fusão e a separação do arame em pequenas gotas, que são transferidas para a poça de fusão. O arco volta a se estabelecer e o ciclo continua. A figura a seguir ilustra as etapas do processo de transferência por curto-circuito.

A soldagem GMAW por curto-circuito é usada com baixas correntes e tensões, e com gases de proteção ativos, como o CO₂ ou misturas com CO₂. Esses parâmetros influenciam a forma de transferência do metal de adição, a estabilidade do arco, a penetração, a diluição, a qualidade e a segurança da soldagem.

Figura 15: Esquemático de modo de transferência curto-circuito.



Fonte: RODRIGUES (2022)

A soldagem GMAW por curto-circuito apresenta algumas vantagens em relação aos outros modos de transferência, como:

- Soldagem em todas as posições, com poça de fusão pequena e de rápida solidificação.
- Baixa penetração e baixa diluição, ideais para a soldagem de chapas finas e de materiais dissimilares.
- Redução da distorção e das tensões residuais na peça soldada, devido ao baixo aporte de calor.
- Baixo nível de respingos e de fumos, o que melhora a qualidade e a segurança da soldagem.

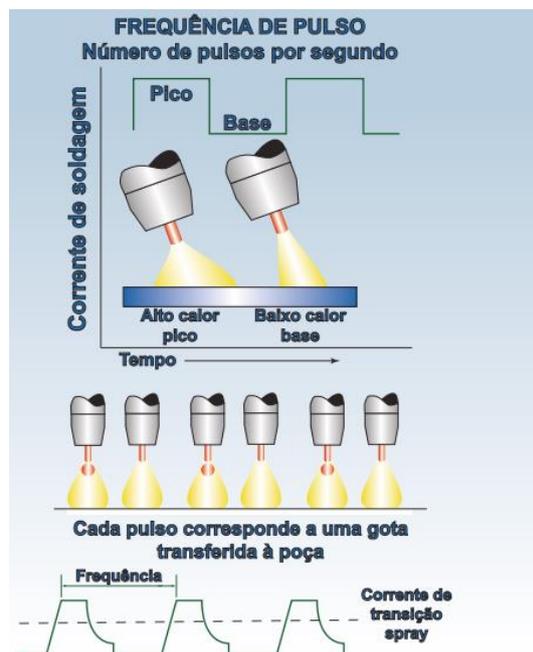
Por outro lado, a soldagem GMAW por curto-circuito também possui algumas limitações, como:

- Não é adequada para a soldagem de materiais de alta resistência e de alta espessura, pois a penetração é insuficiente e o cordão de solda é irregular.
- Requer um controle rigoroso dos parâmetros de soldagem, pois a forma de transferência é sensível a pequenas variações de corrente, tensão, comprimento do arco e composição do gás de proteção.
- Pode causar defeitos como falta de fusão, porosidade, trincas e mordeduras, se os parâmetros de soldagem não forem bem ajustados.

2.4.8.2 Pulsado

Os equipamentos inversores modernos possuem recursos eletrônicos que possibilitam o maior controle da corrente fornecida. A corrente pulsada consiste em uma corrente de base e uma corrente de pico em um período controlado, conforme Figura 16, a corrente de base tem a função de manter o arco aberto e conduzir a poça de fusão, porém não realiza a transferência metálica. Quando corretamente parametrizado, durante a corrente de pico ocorrerá a transferência metálica de uma gota do consumível, este processo é denominado ODPP (*One Drop Per Pulse*), desta forma, alcança-se um processo de soldagem altamente estável e com níveis baixos de respingo.

Figura 16 - Esquemático de modo de transferência e comportamento da corrente no tempo.



Fonte: RODRIGUES (2022)

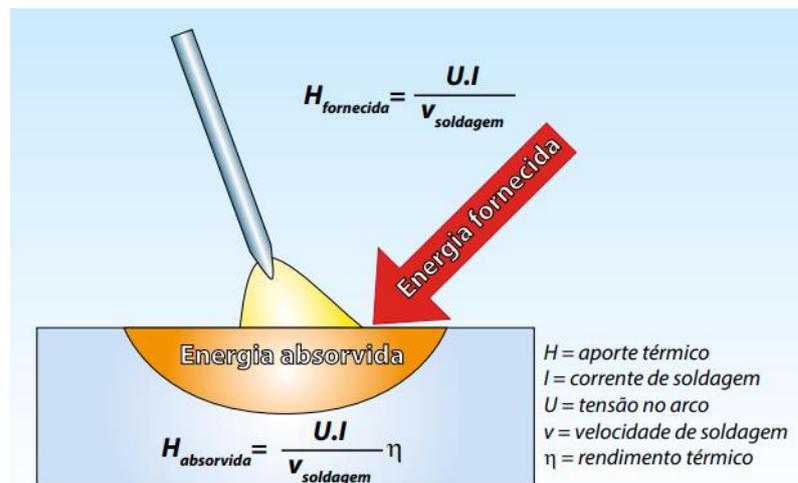
Considerando a tendência da indústria de otimizar os projetos e diminuir as espessuras das peças, o modo de transferência pulsada, que consiste na variação da corrente entre um nível elevado e um baixo, possibilita ao processo uma corrente média mais reduzida, apresentando um ótimo desempenho neste tipo de aplicação (MIRANDA, 2021).

Além disso, segundo Narayanan (2014), em testes realizados a utilização de menor aporte de calor associada a utilização de corrente pulsada apresentou resultados positivos quanto a quantidade de poros em chapas galvanizadas soldadas através do processo GMAW.

2.4.9 Heat input

Heat input ou aporte de calor na soldagem é a potência que o arco elétrico transfere à peça em razão da velocidade de deslocamento do eletrodo. O aporte de calor pode ser controlado através da alteração dos parâmetros de soldagem, como tensão (V), corrente (A), velocidade de soldagem, sequência de passes, dentre outros, observando sempre as restrições impostas pelo diâmetro do eletrodo, pela configuração da junta, pelo tipo de fonte e pelo processo de soldagem. É essencial seguir às orientações do fabricante quanto aos parâmetros de soldagem apropriados para cada tipo e diâmetro do consumível de soldagem, pois um aporte de calor elevado pode ocasionar problemas como perda de performance na soldagem, diminuição da resistência mecânica, modificação da microestrutura, dentre outros, devido a alteração na taxa de resfriamento da peça soldada. O pré-aquecimento pode auxiliar no ajuste do aporte de calor, reduzindo a taxa de resfriamento, e conseqüentemente a zona termicamente afetada, prevenindo a formação de microestruturas indesejáveis. Na Figura 17 abaixo veja equação para calcular o *Heat input*.

Figura 17: Modo de calcular o aporte de calor (*heat input*).



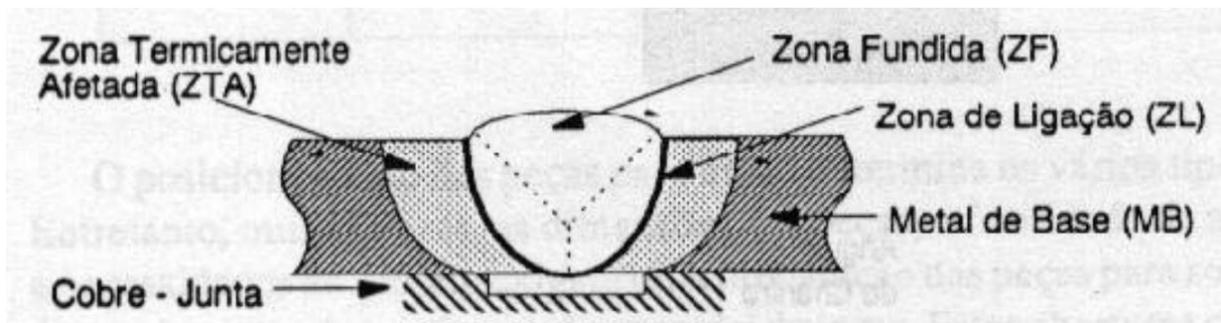
Fonte: RODRIGUES (2022)

2.4.10 Regiões da solda

Durante o processo de soldagem, o calor e a deformação afetam diferentes zonas da junta soldada, causando mudanças na sua estrutura e no seu comportamento mecânico. As principais zonas analisadas em uma junta soldada são: O Metal Base (MB), Zona de ligação (ZL), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona Fundida (ZF). A Figura 18 ilustra esquematicamente essas regiões. Essas regiões são importantes para avaliar a qualidade e as

propriedades da solda, como a forma e a composição dos seus constituintes, a dureza, a resistência e a capacidade de resistir à fratura (MODENESI, 2009).

Figura 18: Esquemático da junta soldada.



Fonte: INFOSOLDA (2023)

Metal Base (Base Metal): Material que constitui as partes a serem unidas pelo processo de soldagem. Corresponde às regiões que não sofreram alterações microestruturais ou mecânicas devido ao calor da soldagem.

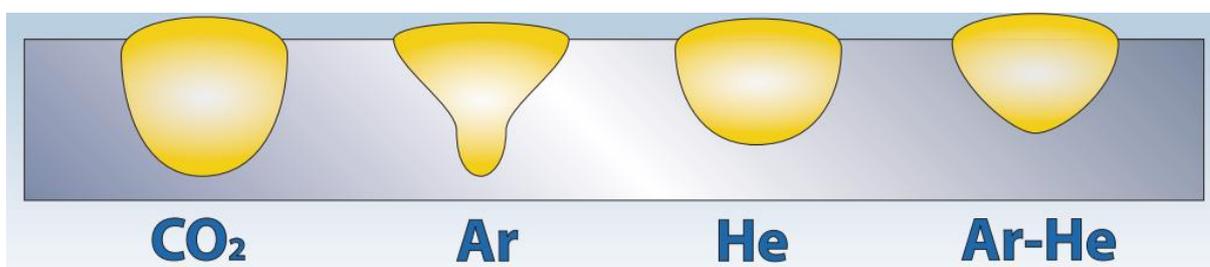
Zona Termicamente Afetada (ZTA): Parte do metal base adjacente à zona fundida que teve suas propriedades e/ou microestrutura modificadas pelo ciclo térmico da soldagem. A extensão e a severidade das mudanças dependem da temperatura máxima atingida, do tempo de permanência nessa temperatura e da taxa de resfriamento.

Zona Fundida (Fusion Zone): Região que foi liquefeita durante a soldagem e que se solidificou formando o metal de solda. A composição química, a microestrutura e as propriedades da zona fundida dependem do material de adição, da diluição com o metal base, do aporte de calor e da atmosfera de proteção utilizados no processo de soldagem (MODENESI, 2009).

2.4.11 Proteção gasosa

A principal função do gás de proteção na soldagem é proteger o metal fundido, o arco, e poça de fusão dos efeitos nocivos do oxigênio e do nitrogênio presentes no ar atmosférico, bem como dos gases CO_2 , H_2O (vapor de água) e H_2 (hidrogênio) que é um dos principais responsáveis por trincas a frio na soldagem. O gás de proteção interfere na estabilidade do arco elétrico, na forma do cordão, na penetração conforme Figura 19, na velocidade e na qualidade da solda. A seleção do gás de proteção depende do tipo de material a ser soldado, do processo de soldagem, da espessura da peça, geometria da junta, do tipo de transferência de metal, do custo, das propriedades mecânicas e da posição de soldagem.

Figura 19: Influência do gás de proteção na morfologia do cordão de solda.



Fonte: COSTA (2021)

Os gases inertes: Na soldagem com gases inertes utiliza gases que não interagem quimicamente com o metal fundido, evitando a sua oxidação. Os principais gases inertes empregados na soldagem são o argônio e o hélio, ou uma combinação dos dois. O argônio apresenta maior densidade e menor custo que o hélio, e favorece uma melhor estabilização do arco elétrico e uma menor voltagem de soldagem. O hélio possui menor densidade e maior custo que o argônio, e proporciona uma maior penetração e uma maior produtividade de soldagem. A mistura de argônio e hélio pode otimizar as propriedades de soldagem, conforme a fração de cada gás. Os gases inertes são indicados para a soldagem de metais não ferrosos, especialmente o alumínio, e também para a soldagem de aços inoxidáveis e ligas de níquel

Os gases ativos: Na soldagem são aqueles que podem ser oxidantes ou redutores e que interagem quimicamente com o metal líquido, modificando sua composição química e suas propriedades, interferindo diretamente nas resistências e na qualidade da solda. Os gases ativos mais usados na soldagem são o CO_2 (dióxido de carbono) e o O_2 (oxigênio), que podem ser puros ou misturados com gases inertes, como o Ar (argônio) e o He (hélio). Os gases ativos são aplicados principalmente na soldagem de aços carbono e baixa liga, pelo processo MAG (Metal

Active Gas), que é uma variação do processo MIG (Metal Inert Gas). Alguns gases, como o N₂ (nitrogênio) e o H₂ (hidrogênio), podem ser inertes para alguns metais, mas ativos para outros, dependendo da afinidade química (BRACARENSE, 2003).

Os gases que influenciam o desempenho do processo de soldagem possuem algumas propriedades básicas que devem ser consideradas, conforme a Tabela 1. Essas propriedades são: propriedades térmicas em altas temperaturas, reação química do gás com os diferentes elementos do metal base e do metal de adição, e efeito de cada gás no modo de transferência de metal. Essas propriedades afetam a forma, a penetração, a velocidade e a qualidade da solda, além da estabilidade do arco elétrico e da transferência de metal. (COSTA, 2021)

Tabela 1: Propriedades dos gases utilizados na soldagem.

Gás	Argônio	Dióxido de Carbono	Hélio	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio
Símbolo	Ar	CO ₂	He	H ₂	O ₂	N ₂
Densidade Relativa [Ar (atm.) = 1,0]	1,38	1,53	0,14	0,07	1,1	0,96
Potencial de Ionização [Ev]	15,7	14,4	24,5	13,5	13,2	14,5
Condutividade Térmica [W/mK]	0,018	0,016	0,152	0,181	0,027	0,026
Densidade [Kg/m ³]	1,784	1,980	0,179	0,090	1,429	1,251

Fonte: COSTA (2021)

A escolha das diferentes combinações de gases, ilustrada na Tabela 2 é determinada pela compatibilidade de cada gás com o arame do metal de adição e o metal de base, que podem ter diferentes composições químicas e propriedades mecânicas. Os gases de proteção também afetam o modo de transferência do metal, que pode ser por curto-circuito, por spray, por globular ou por pulsado, e a profundidade de penetração, que é a distância que o metal fundido penetra no metal de base (COSTA, 2021)

Tabela 2: Comportamento químico e aplicação dos gases de solda.

Gás ou Mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Argônio (Ar)	Inerte	Quase todos os metais (- aço)
Hélio (He)	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Ar + 20 a 50 % He	Inerte	Idem He (melhor que 100% He)
Nitrogênio (N ₂)	Inerte	Cobre e suas ligas
Ar + 20 a 30 % N ₂	Inerte	Idem N ₂ (melhor que 100% N ₂)
Ar + 1 a 2 % O ₂	Ligeiram. oxidante	Aços inox e algumas ligas de Cu
Ar + 3 a 5 % O ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns baixa liga
Ar + 20 a 50 % CO ₂	Oxidante	Diversos aços (- curto-circuito)
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Diversos aços

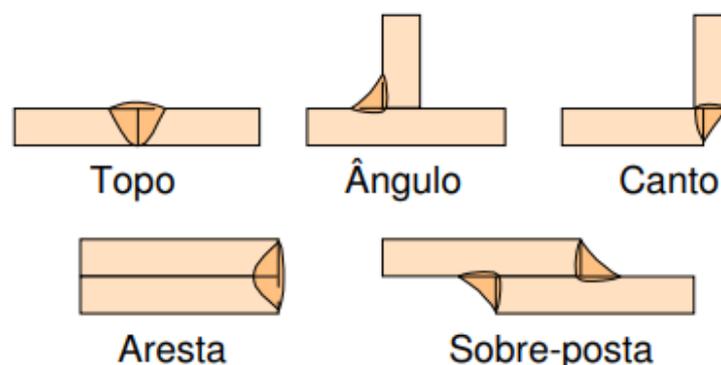
Fonte: COSTA (2021)

A combinação do gás Ar (argônio) com CO₂ (dióxido de carbono) pode promover redução da porosidade na soldagem de aços galvanizados. O CO₂ pode se combinar com o zinco vaporizado, formando óxido de zinco (ZnO) e monóxido de carbono (CO). O ZnO é um sólido que pode ser eliminado da poça de fusão, enquanto o CO é um gás que pode se difundir facilmente. Assim, o CO₂ ajuda a retirar o zinco que poderia provocar bolhas e porosidades na solda. No entanto, o uso de 100% de CO₂ não é recomendável porque o CO₂ também se combina com o silício presente no aço, formando óxido de silício (SiO₂) e CO. O SiO₂ é um sólido que pode se depositar na superfície da solda, impedindo a saída do vapor de zinco e prendendo-o na solda. Além disso, o SiO₂ pode afetar a resistência mecânica da junta soldada. Portanto, é necessário um equilíbrio entre a quantidade de CO₂ que se combina com o zinco e a quantidade que se combina com o silício (FERREIRA FILHO, 2007)

2.4.12 Junta soldada

Os tipos de junta na soldagem são as formas como as peças a serem soldadas são posicionadas e preparadas para receber a solda. Os tipos de junta na soldagem influenciam na qualidade, na resistência e na aparência da solda, bem como no consumo de material e no tempo de execução. Os cinco tipos básicos de junta na soldagem, que são as, Topo (butt), Ângulo (tee), Canto (corner), Aresta (lap) e sobreposta (edge) conforme Figura 20

Figura 20: Tipos de junta.

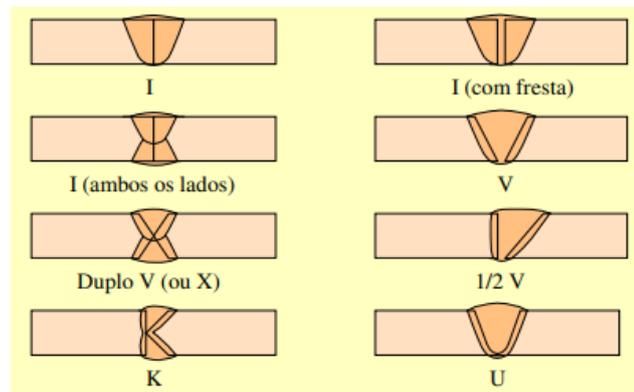


Fonte: MODENESI (2008)

Junta de topo: é a junta entre duas peças que estão alinhadas no mesmo plano. É usada para unir tubulações e estruturas. A junta de topo pode ter diferentes formatos de chanfro, que

é a abertura entre as peças para conter a solda. A junta de topo apresenta a maior eficiência mecânica entre os tipos de junta, porém requer maior habilidade técnica e precisão na sua realização. A junta de topo pode ter diferentes formas de chanfro conforme ilustrado na Figura 21 abaixo.

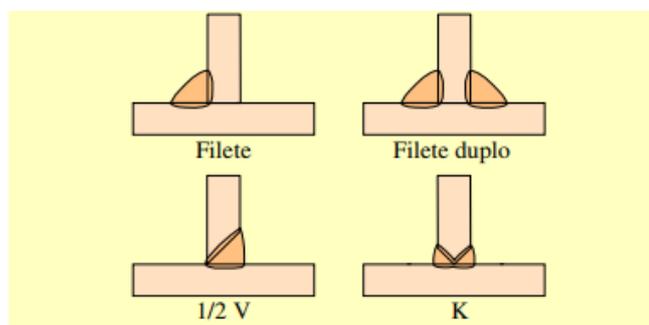
Figura 21: Tipos de junta de topo.



Fonte: MODENESI (2008)

Junta de ângulo: É a junta em que as peças formam um ângulo entre si. É usada para unir chapas, perfis ou cantoneiras. A junta de ângulo pode ter diferentes formas de chanfro conforme ilustrado na Figura 22 abaixo.

Figura 22: Juntas de ângulo.



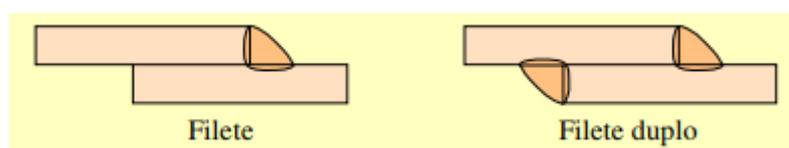
Fonte: MODENESI (2008)

Junta de aresta: É o tipo de junta resultante da soldagem de extremidades de peças paralelas ou quase paralelas. Esse tipo de junta é indicado quando as arestas das chapas ou barras estão próximas e alinhadas em planos paralelos, sem requerer grande resistência mecânica. A solda não cobre inteiramente a largura da junta, o que limita a aplicação da junta de aresta em situações que não exigem alta resistência à pressão e à tração.

A junta de canto: É um tipo de junta resultante da soldagem de bordas de duas ou mais peças que formam um ângulo entre si. Esse tipo de junta é aplicado para chapas de espessura fina ou grossa, bem como para tubos ou peças cilíndricas. A junta de canto pode ter diferentes configurações de chanfro conforme ilustrado na Figura 23. A configuração do chanfro depende da espessura da peça, do tipo de união e do processo de soldagem empregado.

A junta sobreposta: É um tipo de junta resultante da soldagem de uma borda e uma superfície de peças que são sobrepostas uma à outra. Esse tipo de junta é aplicado para unir chapas de espessura variada ou dissimilares. A junta sobreposta também é utilizada para unir peças que não podem ser posicionadas em um plano comum.

Figura 23: Exemplo de junta sobreposta.



Fonte: MODENESI (2008)

2.4.12.1 Junta sobreposta

Juntas sobrepostas são muito utilizadas para soldagem de chapas finas de espessura e largura distintas, que são comuns no setor automotivo. Um dos processos de soldagem muito utilizado em juntas sobreposta é o de soldagem a ponto por resistência que embora seja uma opção muito utilizada apresenta algumas limitações como por exemplo a obrigatoriedade de ter acesso aos dois lados da peça para que se possa realizar a soldagem. Esta situação não é observada no processo de soldagem GMAW onde a soldagem ocorre em apenas um dos lados da peça ajudando a reduzir problemas de projeto (NASCIMENTO, 2011).

Junta Sobreposta: Uma possível razão para o setor automotivo utilizar juntas sobrepostas na soldagem é que esse tipo de junta oferece uma maior resistência à fadiga e à corrosão do que as juntas de topo ou de aresta. As juntas sobrepostas também permitem uma melhor distribuição de tensões e uma maior tolerância a desalinhamentos ou deformações.

Além disso, as juntas sobrepostas podem ser usadas para soldar peças de metal com espessuras ou larguras diferentes, o que é comum no setor automotivo (MODENESI, 2001).

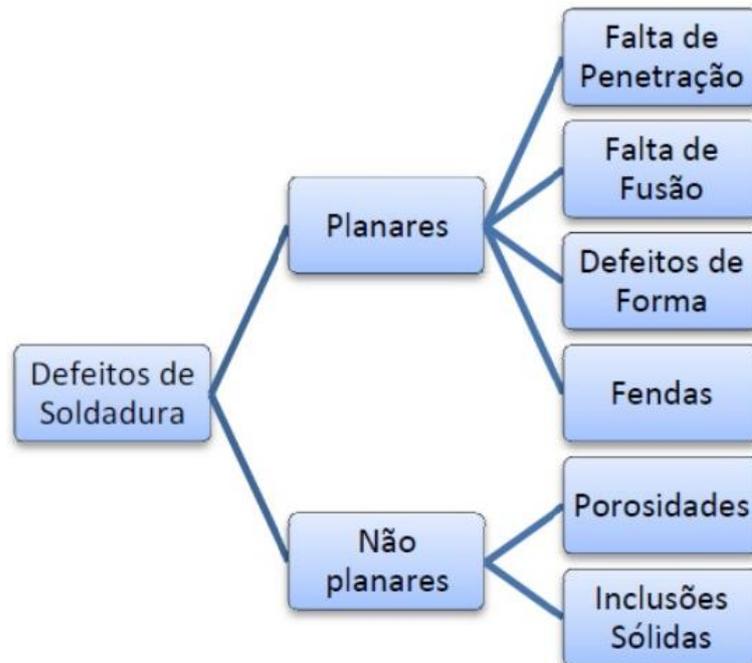
2.4.13 Descontinuidades

De acordo com o livro “Soldagem Fundamentos e Tecnologia”, as descontinuidades são interrupções ou violações da estrutura típica ou esperada de uma junta soldada. Elas ainda podem consideradas como defeitos de acordo com o código normativo ou contrato utilizado. O livro Welding Inspection, da American Welding Society, categoriza as descontinuidades em dimensionais, estruturais e de propriedades inadequadas, sendo elas:

- Dimensionais: Distorção, dimensões incorretas da solda, perfil incorreto da solda.
- Descontinuidades estruturais, porosidades, inclusões de tungstênio, falta de fusão, falta de penetração, mordedura, trincas e outras.
- Propriedades inadequadas, propriedades mecânicas, propriedades químicas, e outras.

Já segundo o instituto internacional de soldagem “IIW”, as descontinuidades e ou defeitos são divididos em planares e não planares conforme ilustrado na figura abaixo:

Figura 24: Defeitos em soldagem conforme IIW.

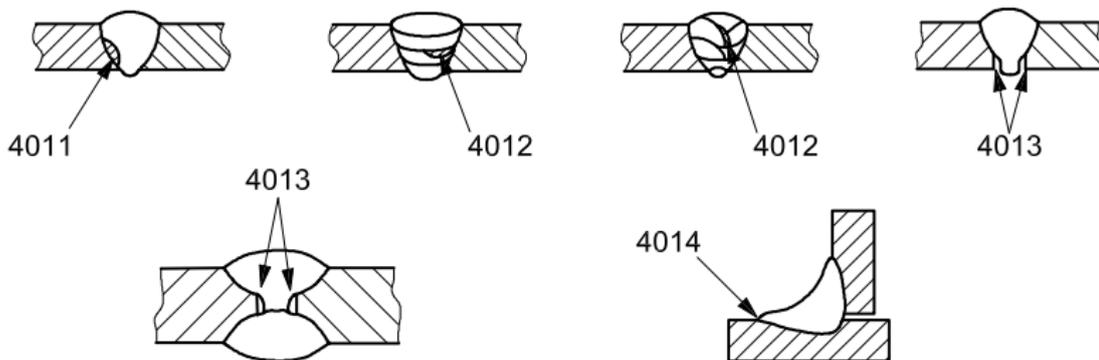


Fonte.: RODRIGUEZ (2022)

No que tange a soldagem pelo processo MIG/MAG, entretanto, são descontinuidades de soldagem mais frequentes em comparação com outros métodos de fusão os defeitos de raiz, falta de fusão, trinca de solidificação, porosidade, respingo e mordedura os defeitos de raiz são mais comuns na soldagem MIG/MAG com utilização de arames tubulares (WEMAN, 2006).

A falta de fusão segundo norma ISO 6520-1 - *Welding and allied processes — Classification of geometric imperfections in metallic materials — Part 1: Fusion welding*, pode ocorrer entre metal depositado e metal base ou entre passes. Na Figura 25 abaixo pode-se observar a falta de fusão entre metal depositado e metal base nas referências 4011 (falta de fusão na parede lateral), 4012 (falta de fusão entre entre passes), 4013 (falta de fusão na raiz), 4014 (microfalta de fusão).

Figura 25: Defeitos exemplificados pela ISO 6520-1.



Fonte: ISO 6520-1 (2007)

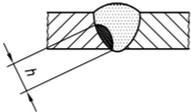
Os defeitos mais comuns na soldagem GMAW de aços galvanizados serão detalhados nos tópicos seguintes.

2.4.13.1 Falta de fusão

A falta de fusão é uma descontinuidade séria e é mais frequentemente encontrada na soldagem pelo processo MIG/MAG quando comparada aos processos MMA e TIG. A norma ISO 5817 – Soldagem, a qual especifica níveis de qualidade de imperfeições para a juntas soldadas, categoriza três níveis de qualidade, sendo eles B, C e D. A falta de fusão pode ser permitida em pequenas quantidades de acordo com este código normativo conforme sua localização (superficial ou interna) a depender do nível de qualidade conforme tabelas abaixo:

Tabela 3: Limites para imperfeições

Table 1 — Limits for imperfections

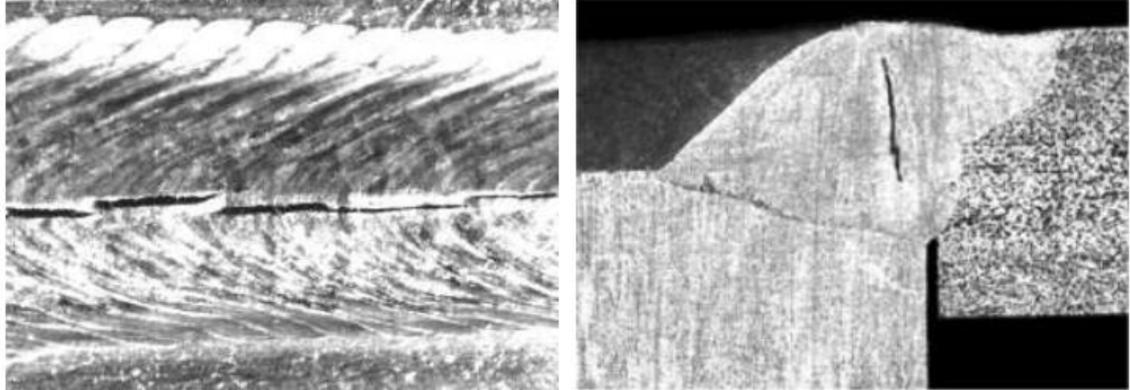
No.	ISO 6520-1 reference	Imperfection designation	Remarks	r mm	Limits for imperfections for quality levels		
					D	C	B
1 Surface imperfections							
1.5	401	Lack of fusion (incomplete fusion)	—	≥ 0,5	Not permitted	Not permitted	Not permitted
		Micro lack of fusion	Only detectable by micro examination		Permitted	Permitted	Not permitted
2.12	401	Lack of fusion (incomplete fusion)		≥ 0,5	Short imperfections permitted, but not breaking of the surfaces — butt welds: $h \leq 0,4 s$, but max. 4 mm — fillet welds: $h \leq 0,4 a$, but max. 4 mm	Not permitted	Not permitted
	4011	Lack of side wall fusion					
	4012	Lack of inter-run fusion					
	4013	Lack of root fusion					

Fonte: adaptada de ISO 5817 (2014)

2.4.13.2 Trinca de solidificação

A trinca de solidificação ocorre nas etapas finais de solidificação com a presença de segregações do metal de solda. Ela ocorre em altas temperaturas, aparece nos contornos de grão e em geral são longitudinais, superficiais e frequentemente observadas no centro do cordão quando o metal de solda não se funde completamente, deixando uma região sem a coalescência, conforme ilustrado pela Figura 26. Dentre os fatores críticos que potencializam a ocorrência deste defeito tem-se as impurezas como os elementos fósforo e enxofre, os quais possuem ponto de fusão muito inferiores a diversos metais base (BRACARENSE, 2022).

Figura 26: Exemplos de trincas no centro do cordão (a) trinca superficial observada de cima em um cordão TIG em aço inoxidável e (b) trinca interna em uma solda unindo peças de aços de baixo e médio teores de carbono.



Fonte: MODENESI (2012)

A trinca de solidificação com exceção das microtrincas (altura x comprimento < 1mm²) são consideradas como sérias e não são aceitáveis em nenhum dos critérios de qualidade B, C ou D.

Tabela 4: Limites para imperfeições em soldas, segundo ISO 5817

Table 1 — Limits for imperfections

No.	ISO 6520-1 reference	Imperfection designation	Remarks	t mm	Limits for imperfections for quality levels		
					D	C	B
1 Surface imperfections							
1.1	100	Crack	—	≥ 0,5	Not permitted	Not permitted	Not permitted
1.2	104	Crater crack	—	≥ 0,5	Not permitted	Not permitted	Not permitted
2 Internal imperfections							
2.1	100	Cracks	All types of crack except microcracks and crater cracks	≥ 0,5	Not permitted	Not permitted	Not permitted
2.2	1001	Microcracks	A crack usually only visible under the microscope (50 ×)	≥ 0,5	Permitted	Acceptance depends on type of parent metal with particular reference to crack sensitivity	

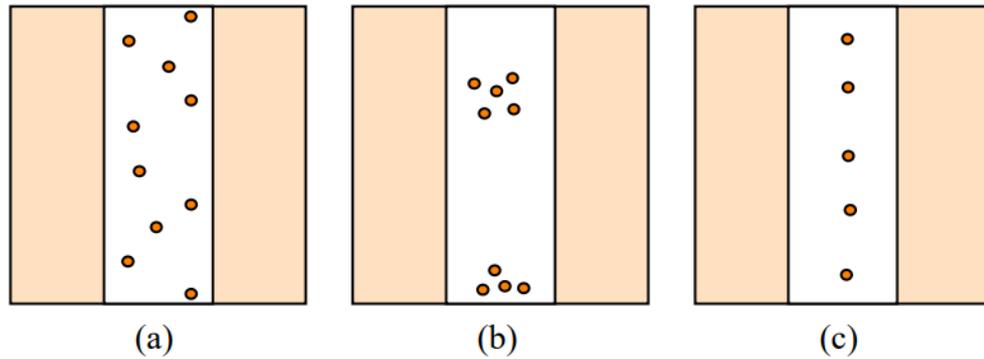
Fonte: adaptada de ISO 5817 (2014)

2.4.13.3 Porosidade

A porosidade pode ser encontrada de diferentes formas conforme apresentado na figura abaixo, sendo distribuída, agrupada ou alinhada. Ela pode ser causada pelo aprisionamento de gases durante a solidificação da poça de fusão. Dentre as principais causas, podemos citar a presença de contaminantes como óleo, graxas, ferrugem e umidade na região da junta, ou nos consumíveis de soldagem. Os parâmetros de soldagem e controle da correta proteção gasosa

são também importantes para prevenção dos poros. Fonte: Soldagem Fundamentos e Tecnologia, terceira edição”.

Figura 27: Esquema dos tipos de distribuição de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada e (c) alinhada (radiografia esquemática)



Fonte: MODENESI (2008)

Quanto ao critério de aceitação de poros conforme ISO 5817, é permitido a presença de poros agrupados em todos os três níveis de qualidade (B, C e D), correspondendo a 4% (nível B) e até 16% (nível D) da área de solda projetada.

2.4.13.4 Respingos

Os respingos são gotas de metal de solda ou metal de adição expelidas durante a soldagem aderidos à superfície do material base ou ao metal de solda solidificado (ISO 6520-1).

Figura 28: Respingos em solda.



Fonte: MATERIAL WELDING (2023)

Tabela 5: Limite para quantidade de respingo segundo ISO 5817

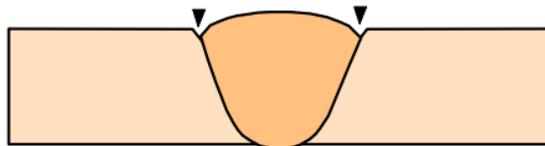
Table 1 — Limits for imperfections

No.	ISO 6520-1 reference	Imperfection designation	Remarks	t mm	Limits for imperfections for quality levels		
					D	C	B
1 Surface imperfections							
1.23	602	Spatter	—	$\geq 0,5$	Acceptance depends on application, e.g. material, corrosion protection		

Fonte: adaptada de ISO 5817 (2014)

2.4.13.5 Mordedura

A mordedura é a depressão formada no metal de base ao longo da borda do cordão de solda provocada pela ação do arco elétrico, deixando uma região sem coalescência. As mordeduras atuam como concentradores de tensão as quais podem vir a comprometer a integridade da junta soldada (Fonte: Soldagem Fundamentos e Tecnologia).

Figura 29: Exemplo esquemático de mordedura.

Fonte: MODENESI (2001)

Tabela 6: Limite para tamanho de mordedura segundo ISO 5817

Table 1 (continued)

No.	ISO 6520-1 reference	Imperfection designation	Remarks	t mm	Limits for imperfections for quality levels		
					D	C	B
1.7	5011 5012	Continuous undercut Intermittent undercut	Smooth transition is required. This is not regarded as a systematic imperfection.	0,5 to 3	Short imperfections: $h \leq 0,2 t$	Short imperfections: $h \leq 0,1 t$	Not permitted
				> 3	$h \leq 0,2 t$, but max. 1 mm	$h \leq 0,1 t$, but max. 0,5 mm	$h \leq 0,05 t$, but max. 0,5 mm

Fonte: adaptada de ISO 5817, 2014

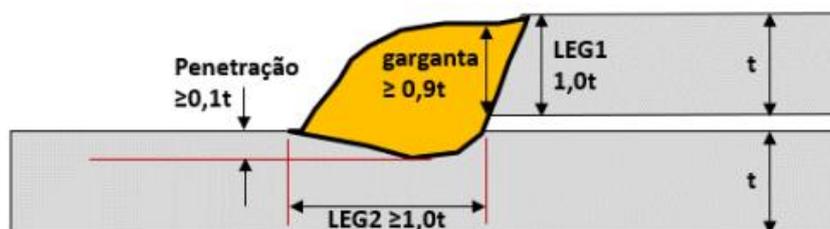
2.4.14 Ensaios de integridade

Os ensaios não destrutivos são ensaios nos quais não inviabilizam o uso posterior da peça ou componente. Diversão são esses ensaios, assim como, ensaio visual, líquido penetrante, ultrassom, partículas magnéticas, radiografia, dentre outros. Os ensaios não destrutivos são muito utilizados para avaliarem as imperfeições em soldagens (MODENESI, 2001).

2.4.14.1 Ensaio visual

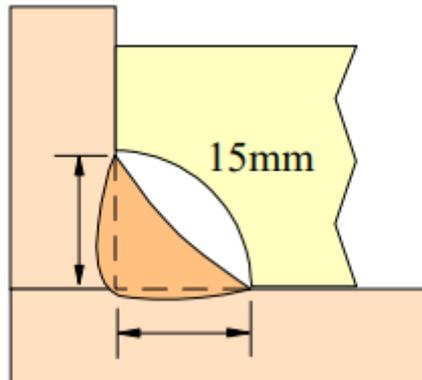
O ensaio visual é uma técnica de ensaio não destrutivo simples, muito utilizada e que em geral precede os outros ensaios. O ensaio pode ser realizado a olho nú ou com o uso de outros instrumentos (MODENESI, 2001). O ensaio é utilizado para avaliar condições de superfície, alinhamento, formato e evidências de vazamento. O ensaio visual direto é geralmente utilizado quando se tem uma distância do olho à peça de até 600mm e um ângulo não maior que 30 graus da superfície. A intensidade luminosa deve ser de no mínimo 1000 lux e o exame pode ser auxiliado com o uso de espelhos ou lente de aumento. O exame deve possuir um checklist com o objetivo de auxiliar no planejamento e na confirmação de que as observações necessárias foram realizadas (ASME, 2023).

Figura 30: Representação esquemática de uma junta sobreposta e sua avaliação visual e dimensional



Fonte: OLIVEIRA (2021)

Figura 31: Esquema de gabarito para a determinação da dimensão de soldas de filete.



Fonte: MODENESI (2001)

2.4.14.2 Radiografia

O ensaio radiográfico é um poderoso ensaio não destrutivo que pode detectar descontinuidades com poucos milímetros de extensão. É amplamente utilizado para a detecção de descontinuidades internas. Amplamente utilizado para qualificações de procedimentos e soldadores, é um ensaio presente em diversos códigos normativos. A tabela A-110 do código ASME volume V que trata os ensaios não destrutivos, recomenda por exemplo o ensaio Radiográfico para identificação de diversos defeitos volumétricos de soldagem assim como a presença de poros (ASME, 2023)

Tabela 7: Ensaios sugeridos para detecção de imperfeições na solda.

ARTICLE 1

2010 SECTION V

TABLE A-110
IMPERFECTION VS TYPE OF NDE METHOD

	Surface [Note (1)]		Sub-surf. [Note (2)]		Volumetric [Note (3)]				UTT
	VT	PT	MT	ET	RT	UTA	UTS	AE	
Service-Induced Imperfections									
Abrasive Wear (Localized)	●	○	○	---	●	○	○	---	○
Baffle Wear (Heat Exchangers)	●	---	---	○	---	---	---	---	---
Corrosion-Assisted Fatigue Cracks	○	○	●	---	○	●	---	●	---
Corrosion -Crevice	●	---	---	---	---	---	---	---	○
-General / Uniform	---	---	---	○	○	---	○	---	●
-Pitting	●	●	○	---	●	○	○	○	○
-Selective	●	●	○	---	---	---	---	---	○
Creep (Primary) [Note (4)]	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Erosion	●	---	---	---	●	○	○	---	○
Fatigue Cracks	○	●	●	○	○	●	---	●	---
Fretting (Heat Exchanger Tubing)	○	---	---	○	---	---	---	---	○
Hot Cracking	---	○	○	---	○	○	---	○	---
Hydrogen-Induced Cracking	---	○	○	---	○	○	---	○	---
Intergranular Stress-Corrosion Cracks	---	---	---	---	---	○	---	---	---
Stress-Corrosion Cracks (Transgranular)	○	○	●	○	○	○	---	○	---
Welding Imperfections									
Burn Through	●	---	---	---	●	○	---	---	○
Cracks	○	●	●	○	○	○	○	●	---
Excessive/Inadequate Reinforcement	●	---	---	---	●	○	---	---	○
Inclusions (Slag/Tungsten)	---	---	○	○	○	○	○	○	---
Incomplete Fusion	○	---	○	○	○	○	○	○	---
Incomplete Penetration	○	○	○	○	○	○	○	○	---
Misalignment	●	---	---	---	●	○	---	---	---
Overlap	○	○	○	○	---	○	---	---	---
Porosity	●	○	○	---	●	○	○	○	---
Root Concavity	●	---	---	---	●	○	○	○	○
Undercut	●	○	○	○	●	○	○	○	---
Product Form Imperfections									
Bursts (Forgings)	○	●	●	○	○	○	○	●	---
Cold Shuts (Castings)	○	●	●	○	○	○	○	○	---
Cracks (All Product Forms)	○	○	○	○	○	○	○	○	---
Hot Tear (Castings)	○	○	○	○	○	○	○	○	---
Inclusions (All Product Forms)	---	---	○	○	○	○	○	○	---
Lamination (Plate, Pipe)	○	○	○	---	---	○	○	○	●
Laps (Forgings)	○	○	○	○	○	---	○	○	---
Porosity (Castings)	●	○	○	---	○	○	○	○	---
Seams (Bar, Pipe)	○	○	○	○	○	○	○	○	---

Legend: AE – Acoustic Emission
 ET – Electromagnetic (Eddy Current)
 MT – Magnetic Particle
 PT – Liquid Penetrant
 RT – Radiography
 UTA – Ultrasonic Angle Beam
 UTS – Ultrasonic Straight Beam
 UTT – Ultrasonic Thickness Measurement
 VT – Visual

● – All or most standard techniques will detect this imperfection under all or most conditions.
 ○ – One or more standard technique(s) will detect this imperfection under certain conditions.
 ○ – Special techniques, conditions, and/or personnel qualifications are required to detect this imperfection.

GENERAL NOTE: Table A-110 lists imperfections and NDE methods that are capable of detecting them. It must be kept in mind that this table is very general in nature. Many factors influence the detectability of imperfections. This table assumes that only qualified personnel are performing nondestructive examinations and good conditions exist to permit examination (good access, surface conditions, cleanliness, etc.).

NOTES:

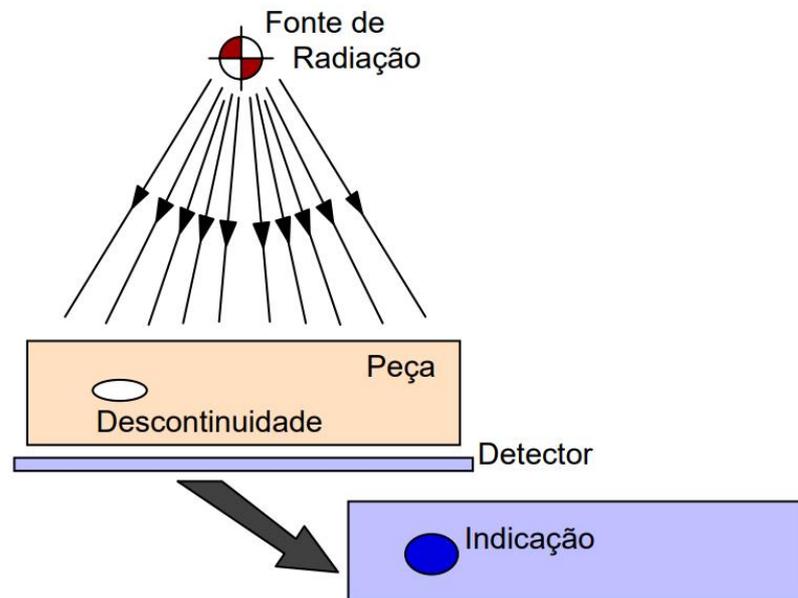
- (1) Methods capable of detecting imperfections that are open to the surface only.
- (2) Methods capable of detecting imperfections that are either open to the surface or slightly subsurface.
- (3) Methods capable of detecting imperfections that may be located anywhere within the examined volume.
- (4) Various NDE methods are capable of detecting tertiary (3rd stage) creep and some, particularly using special techniques, are capable of detecting secondary (2nd stage) creep. There are various descriptions/definitions for the stages of creep and a particular description/definition will not be applicable to all materials and product forms.

Fonte: ASME (2023)

A radiografia é baseada nas variações da absorção da radiação eletromagnética penetrante (raios X) em função das alterações de densidade, composição e espessura da peça

sob inspeção. O ensaio requer cuidados especiais por questões de segurança em relação a radiação e aos seus efeitos danosos aos seres vivos (MODENESI, 2001).

Figura 32: Inspeção Radiográfica.



Fonte: MODENESI (2001)

2.4.14.3 Macrografia

Colpaert (2008) caracteriza a macrografia como a análise da aparência de uma peça ou amostra, utilizando uma seção plana devidamente polida e, geralmente, tratada com um reativo apropriado. A representação visual resultante é denominada macroestrutura. Essa avaliação é conduzida a olho nu ou com o auxílio de uma lupa.

Figura 33 : Macrografia de junta sobreposta soldada através do processo MIG/MAG.



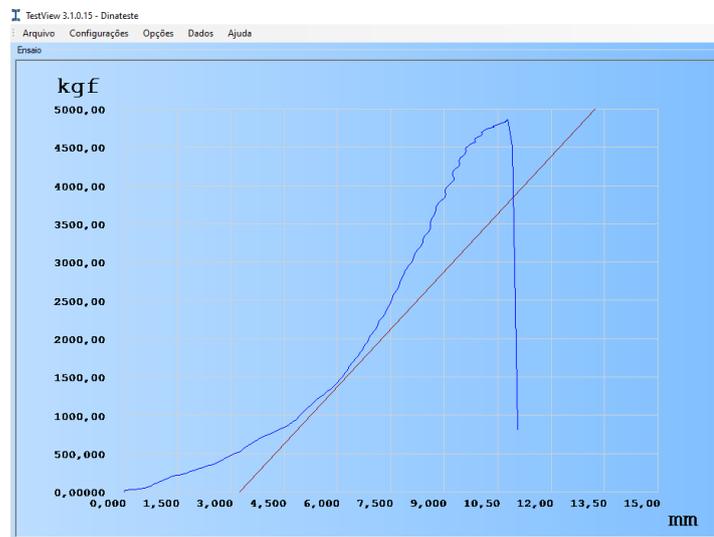
Fonte: OLIVEIRA (2021)

2.4.14.4 Ensaio de tração

O teste ou ensaio de tração é amplamente utilizado na avaliação de materiais. De maneira simples, consiste em segurar as extremidades opostas de um corpo de prova dentro da estrutura de carga de uma máquina especializada. A máquina aplica uma força de tração, levando à alongação gradual e, eventualmente, à fratura do item de teste.

Durante esse processo, são registrados dados de força e extensão, oferecendo uma medida quantitativa de como o item de teste se deforma sob a força de tração aplicada, conforme mostrado no gráfico da Figura 34. O teste de tração fornece diversas informações de propriedades mecânicas de um material, entre elas a deformação elástica, limite de escoamento e limite de resistência à tração, propriedades relacionadas à ductilidade assim como alongamento e estrição (ASM, 2000).

Figura 34: Tela do software do equipamento de ensaio de tração com gráfico Força x Deslocamento.



Fonte: Próprio autor (2023)

3 METODOLOGIA

A metodologia científica é o conjunto de técnicas, procedimentos e ferramentas utilizados para a investigação e produção do conhecimento científico de maneira sistemática e confiável. Essa abordagem desempenha um papel crucial em qualquer trabalho de pesquisa, pois fornece a estrutura necessária para a coleta, análise e interpretação dos dados. A aplicação da metodologia científica não apenas garante a validade e confiabilidade dos resultados, mas também possibilita a replicação do estudo por outros pesquisadores, contribuindo assim para a construção de um corpo sólido de conhecimento, promovendo uma abordagem imparcial e objetiva.

Este trabalho objetiva avaliar a influência do consumível de soldagem em aspectos relacionados às características de uma junta soldada de chapa galvanizada de alta resistência, de forma que, para os dois consumíveis utilizados, buscou-se replicar as mesmas condições de soldagem e de ensaios.

3.1 Equipamento

A fonte de soldagem influencia diretamente no desempenho e características do processo de soldagem, de forma geral a fonte irá converter a tensão da rede em tensões mais baixas e altos valores de corrente. Para a soldagem GMAW foi escolhida a utilização de uma fonte de soldagem inversora, a Aristo 500ix, que possui resposta às variações de processo mais rápida em comparação às fontes tradicionais e possui recursos eletrônicos como a corrente pulsada, que segundo a literatura ajuda a reduzir a porosidade quando da soldagem de chapas galvanizadas. Esta fonte está conectada ao alimentador Robofeed 3804W e ao manipulador robótico Motoman MA1440, conforme ilustrado na 35. A tocha de soldagem utilizada foi a Tocha 82W 45° com faixa de trabalho de 500A / 100% com gás mistura, 600A / 100% com gás Co₂, Bocal de 17 (mm) e bico de contato CrCuZr-M8 Ø 1,0 mm.

Figura 35: Exemplo dos componentes e equipamentos utilizados para realização da soldagem.



Fonte: ESAB (2023)

O controlador da fonte é um U82, este possui recurso de seleção de modo de transferência curto-circuito/spray e pulsado. Além disso conta com linhas sinérgicas específicas para o arame e para o gás utilizado, isto facilita no momento da correta parametrização do processo, reduzindo o número de testes até se alcançar um parâmetro estável. Além disto foi utilizado o sistema de pressão de gás (PGS), que oferece uma série de benefícios significativos:

- Monitoramento do processo de soldagem: Incorporando os princípios da Indústria 4.0, o PGS permite o monitoramento em tempo real do processo de soldagem.
- Economia de gás: O sistema pode resultar em uma grande economia de gás nas operações de soldagem, chegando a até 60%.
- Configurável para diferentes misturas de gases: O PGS pode ser ajustado para trabalhar com diferentes misturas de gases, tornando-o versátil para várias aplicações de soldagem.
- Diminuição de respingo: O sistema ajuda a reduzir o respingo durante a soldagem, melhorando a qualidade e a eficiência do processo.
- Melhoria na penetração: O PGS melhora a penetração durante a soldagem, resultando em juntas mais fortes e duráveis.
- Medição do consumo acumulado de gás: O sistema monitora e registra o consumo acumulado de gás, permitindo um melhor controle e planejamento do uso de recursos.

- Sinal de alerta quando falta gás de proteção: O PGS emite um sinal de alerta quando o gás de proteção está acabando, evitando interrupções inesperadas no processo de soldagem.
- LCD multicolorido: O sistema possui um display LCD multicolorido que facilita a leitura e o monitoramento das condições de soldagem. (EASAB, 2023)

3.2 Metal de base

O procedimento de soldagem foi executado utilizando uma chapa de aço eletrolgalvanizado de terceira geração, caracterizada por sua ultra alta resistência mecânica (1000Mpa). Este material foi especificamente desenvolvido para aplicações no setor automotivo. As dimensões da chapa selecionada para o processo foram de 1,5 mm de espessura, 500 mm de comprimento e 180 mm de largura. É importante ressaltar que, como o aço está em fase de desenvolvimento, não foi possível obter informações adicionais sobre suas propriedades e características.

3.3 Metais de adição

Para realização da soldagem foram selecionados dois consumíveis, o ER70S-6, que é comumente empregado pelo setor automotivo neste tipo de aplicação, e o Ok Aristorod 38Zn (ER70S-G). Abaixo informações de propriedades mecânicas requeridas pela classificação normativa, Tabela 8, propriedades mecânicas típicas segundo o fabricante, Tabela 9, composição química requerida pela classificação normativa, Tabela 10, faixa de composição química de controle dos produtos segundo o fabricante, Tabela 11.

Tabela 8: Propriedades mecânicas especificada pela AWS - ASME BPVC.II.C SFA-5.18

Arame	Limite de escoamento	Limite de resistência	Alongamento	Charpy
*ER70S-G	400 (Mpa)	490 (Mpa)	22 (%)	27J @ -30°C
ER70S-6				
*Temperatura de charpy especificada pelo fabricante para o ER70S-G – 27j @ -30°C				

Fonte: ASME (2023)

Tabela 9: Propriedades mecânicas típicas segundo o fabricante*

Arame	Limite de escoamento	Limite de resistência	Alongamento	Charpy
ER70S-G	440 (Mpa)	550 (Mpa)	30 (%)	120J @ -30°C
ER70S-6	483 (Mpa)	583 (Mpa)	26 (%)	91J @ -29°C
*valores de resistência mecânica considerados para soldagem utilizando gás M21 EN ISO				

Fonte: Próprio autor (2023)

Tabela 10: Composição química especificada pela AWS - ASME BPVC.II.C SFA-5.18

Arame	%C	%Si	%Mn	%P	%S	Ni	Cr	Mo	V	Cu**
ER70S-G	_____Não especificado *i_____									
ER70S-6	0,06	0,8	1,4	0,02	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50
	0,15	1,15	1,85	max.	max	max	max	max	max	max
*Os requisitos químicos não são especificados, mas não deve haver adição intencional de Ni, Cr ou Mo superior a 0,15%, ou V superior a 0,03%. A composição deve ser comunicada. Os requisitos são aqueles acordados entre o comprador e o fornecedor.										
**O cobre, devido a qualquer revestimento no eletrodo ou na haste, além do próprio teor de cobre do metal de enchimento, não deve exceder o máximo declarado de 0,50%.										

Fonte: ASME (2023)

Tabela 11: Faixa de composição química de controle segundo o fabricante

Arame	%C	%Si	%Mn	%P	%S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-G*	0,06 - 0,09	0,6 - 0,9	1,25 - 1,5	0 - 0,01	0 - 0,01	-	-	-	-	-
ER70S-6	0,06- 0,15	0,8- 0,15	1,4 - 1,85	0 - 0,02	0 - 0,02	-	-	-	-	-

*Além do controle mais rígido dos principais elementos de liga, são monitorados e controlados outros 14 elementos na especificação interna do ER70S-G (AristoRod 38 Zn)

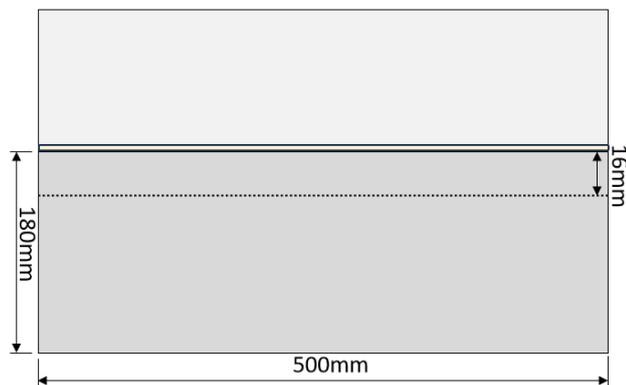
O controle de microelementos de liga no OK AristoRod 38 Zn controla a tensão superficial da poça de fusão para melhorar a desgaseificação de Zn

Fonte: Próprio autor (2023)

3.4 Montagem

Para realização da soldagem foi selecionada uma junta sobreposta, conforme ilustrado na figura 36.

Figura 36: Montagem da junta soldada



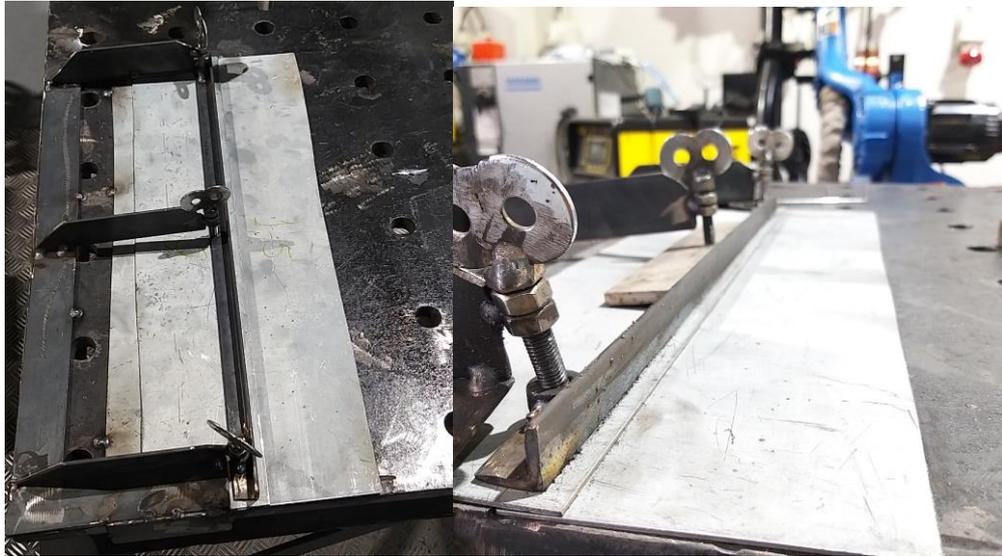
Fonte: Próprio autor (2023)

Esta junta foi fixa no dispositivo mostrado na

Figura 37, a fim de garantir que a junta possuísse rigidez suficiente para que não empenasse durante a soldagem devido ao ciclo térmico da solda e contração do metal de solda.

A fixação foi feita de forma a manter o contato entre as chapas sem abertura em todo o comprimento.

Figura 37: Foto da junta real antes de ser soldada presa no dispositivo de fixação



Fonte: Próprio autor (2023)

3.5 Processo de soldagem

Os parâmetros de soldagem foram escolhidos conforme bibliografia apresentada a respeito das melhores práticas para a soldagem de aços galvanizados. A soldagem foi feita utilizando dois modos de transferência, com cada um dos arames, para que fosse possível também avaliar a influência do modo de transferência no desempenho da junta. Os modos de transferência utilizados foram o curto-circuito e o modo pulsado, os parâmetros para cada um desses são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros utilizados no processo de soldagem GMAW

Modo de transferência	Corrente	Tensão	Velocidade de alimentação	Indutância	Velocidade de soldagem	Vazão de gás	Stick out
Curto-circuito	125-130 A	16 - 17 V	5,6 m/min	60%	70cm/ min	13 l/min	13 a 15 cm
Pulsado	80 – 90 A	28 – 29 V	5,0 m/min	80%	57 cm/min	13 l/min	13 a 15 cm

Fonte: Próprio autor (2023)

Para estes parâmetros o *heat input* médio para o modo de transferência de curto-circuito será de aproximadamente 0,19 kJ/mm e o modo pulsado de 0,25 kJ/mm.

Conforme proposto pela literatura, a técnica de soldagem utilizada foi com progressão “empurrando” com ângulo de 25°, conforme ilustrado na Figura 38. Além deste ângulo, por se tratar de uma junta de sobreposição, foi definido um ângulo de ataque de aproximadamente 35°, mantido para todos os cenários.

Figura 38: Ângulos envolvidos na soldagem



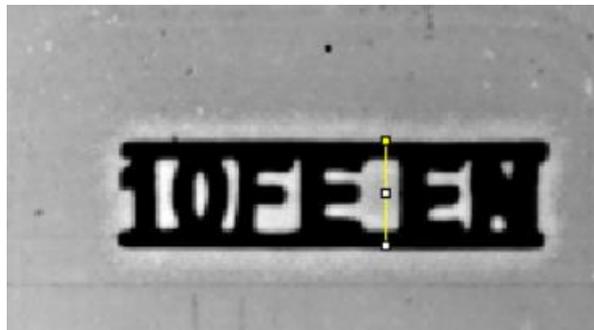
Fonte: Próprio autor (2023)

Tendo em vista que o objetivo é comparar a influência do arame no desempenho da junta soldada, o mesmo parâmetro foi mantido para os dois arames, foram soldados três corpos de prova em cada um dos cenários.

3.6 Ensaios

Para efeito comparativo da porosidade das juntas soldadas com cada arame, foi avaliada a área de porosidade através de ensaio radiográfico em todas as juntas, essas radiografias foram realizadas conforme ASTM E1032. Os filmes foram digitalizados, para que através do software imagem (imagemj, fosse quantificada a área dos poros em cada uma das juntas. Uma vez que os filmes digitalizados não possuíam escala legível, foi adotado como padrão de escala a altura do padrão de marcação de filmes, conforme Figura 39, este padrão foi definido como 10 unidades de medida.

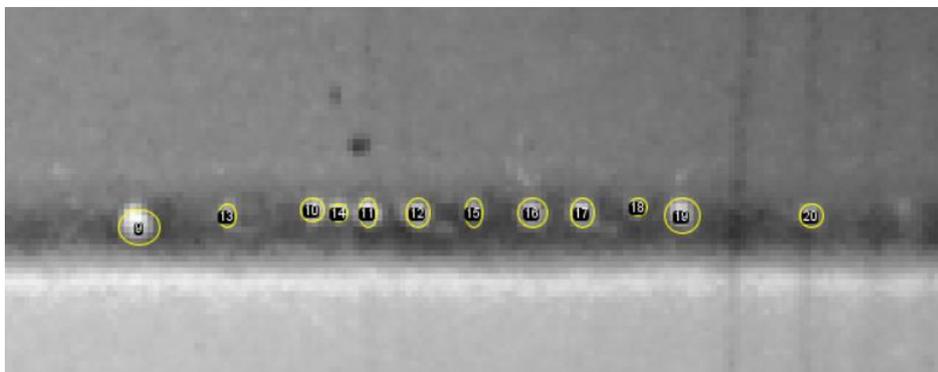
Figura 39: Padrão de escala filmes radiográficos



Fonte: Próprio autor (2023)

Após estabelecer o padrão de medida, os poros serão medidos conforme Figura 40, estes serão identificados manualmente e serão aproximados por elipses. O cálculo da área e feito automaticamente pelo software.

Figura 40: Exemplo de medição de poros em filme radiográfico

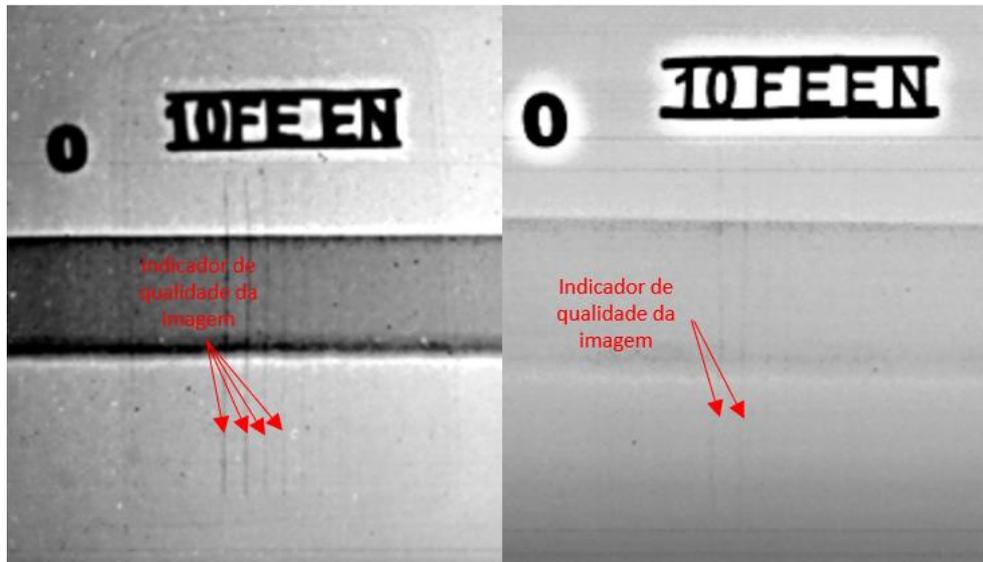


Fonte: Próprio autor (2023)

Além disso, alguns dos filmes não possuíam resolução suficiente para identificar de forma satisfatória os poros em cada uma das juntas, sendo assim, foram selecionados os

melhores filmes, em termos de qualidade de imagem, conforme Figura 41, para quantificar a área de porosidade da junta. Para auxiliar na identificação clara dos poros, as imagens selecionadas tiveram sua nitidez e contraste aumentadas em software de tratamento de imagem.

Figura 41: Detalhe de qualidade radiográfica nos filmes digitalizados

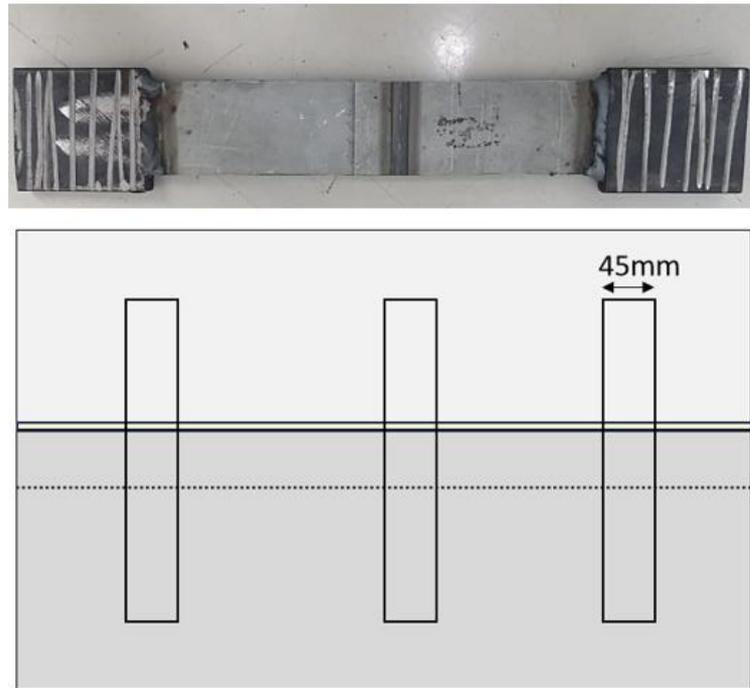


Fonte: Próprio autor (2023)

Além disso, para cada um dos cenários soldados, foram cortados três corpos de prova de tração transversal, conforme

Figura 42. Esses corpos de prova foram cortados da junta com menor índice de porosidade para cada cenário. Na sequência, estes corpos de prova foram ensaiados seguindo o procedimento recomendado pela AWS B4.0, os dados de cada ensaio foram compilados para possibilitar a comparação de desempenho entre os 4 testes.

Figura 42: Corpo de prova de tração transversal retirado da chapa soldada



Fonte: Próprio autor (2023)

Por fim, para avaliar a morfologia do cordão de solda e a influência de cada modo de transferência e arame na junta foram feitas duas macrografias para cada cenário. As diferenças dimensionais foram avaliadas no software Imagem e serão discutidas no capítulo a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os corpos de prova soldados foram identificados de 1 a 13, conforme a Tabela 12. Dos 13 foram selecionados 04 corpos de provas para realização dos testes de macrografia e ensaio de tração transversal.

Tabela 12: Relação de identificação dos corpos de prova.

Consumível	Modo de transferência	
	Curto-circuito	Pulsado
Aristorod 38Zn	CP-11 / CP-12 / CP-13	CP-05 / CP-06 / CP-07
ER70S-6	CP-08 / CP-09 / CP-10	CP-01 / CP-02 / CP-03

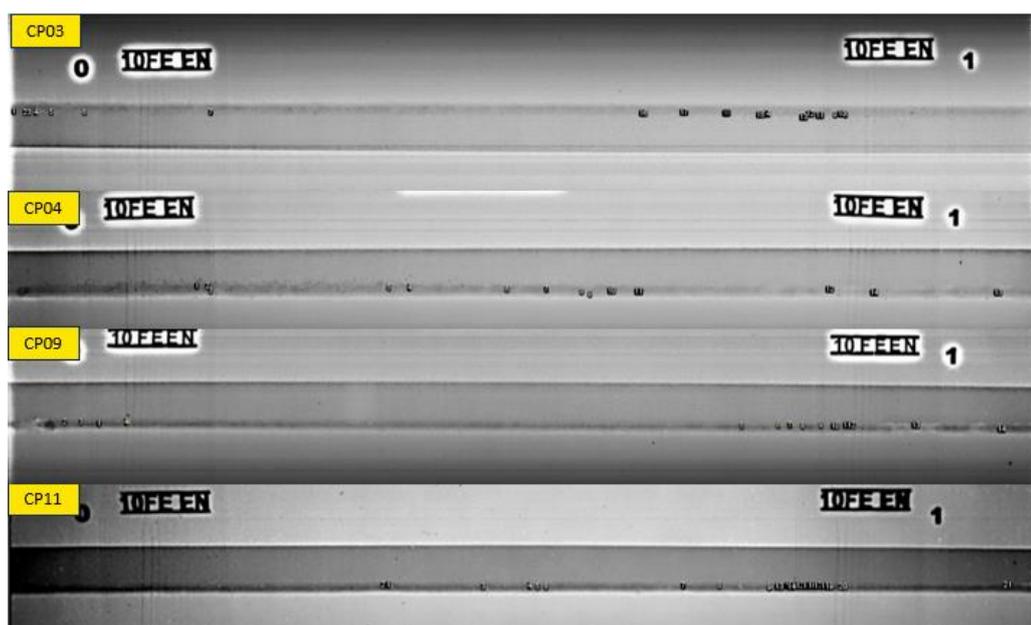
Fonte: Próprio autor (2023)

4.1 Resultado radiografia

Os filmes radiográficos digitalizados foram tratados para aumentar a nitidez e contraste dos poros e permitir a melhor distinção dos poros na junta. Os poros foram medidos com o auxílio do software Imagem, conforme

Figura 43 e a área total de poros encontrada em cada junta é apresentada na Tabela 13.

Figura 43: Quantificação dos poros em filmes radiográficos com qualidade satisfatória.



Fonte: Próprio autor (2023)

Tabela 13: Resultado da quantificação de poros.

Consumível	Área total de poros (unidade arbitrada ²)	
	Curto-circuito	Pulsado
Aristorod 38Zn	17,7	18,4
ER70S-6	24,3	23,2

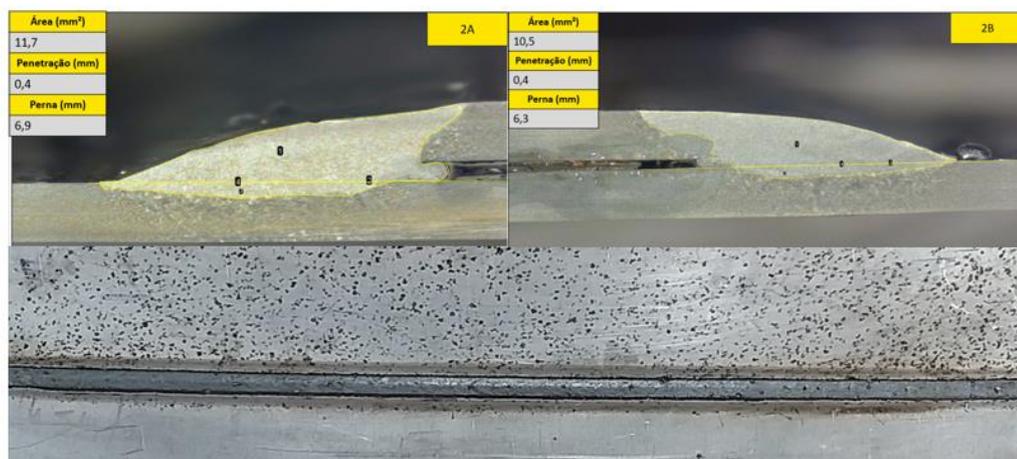
Fonte: Próprio autor (2023)

Conforme resumido na Tabela 13, observa-se reduções superiores a 20% na quantidade total de poros para as juntas com a utilização do arame ER70S-G (Aristorod 38Zn),

4.2 Resultado Macrografia

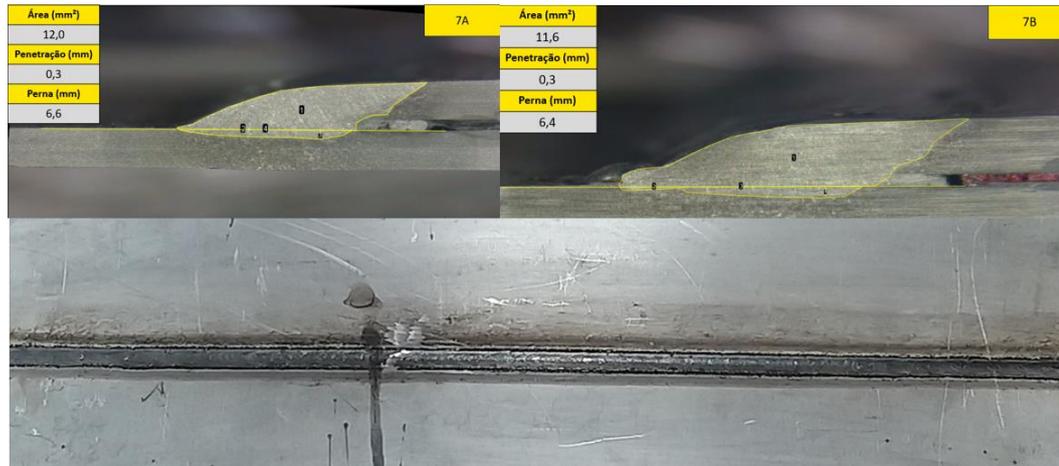
O modo de transferência curto-circuito apresentou penetração de até 4,3 vezes maior quando comparado com o mesmo consumível, como pode ser observado nas Figura 44 a Figura 47. Além disso, apresentou uma redução de aproximadamente 10% no tamanho da perna, estas características estão relacionadas com o fato de que o arco elétrico no modo curto-circuito possui menor tensão e, portanto, atuou de forma mais concentrada.

Tendo em vista que o cordão ficou mais concentrado, pode ser também observado que os cordões produzidos no modo curto-circuito apresentaram maior convexidade, quando comparado ao cordão pulsado, esta característica está relacionada também aos resultados de propriedades mecânicas que serão apresentados no próximo tópico.

Figura 44: CP-02 ER70S-6 – pulsado.

Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 45: CP-07 ER70S-G (Aristorod 38Zn) – pulsado



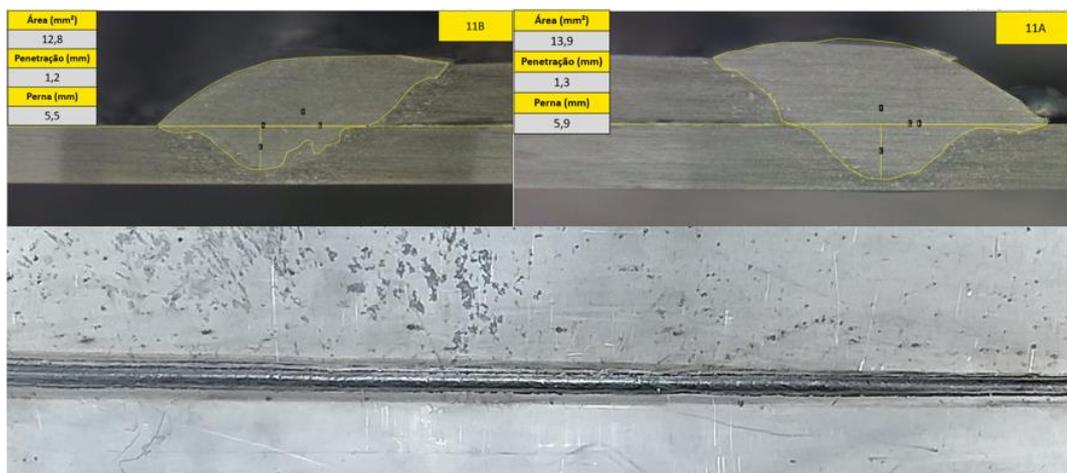
Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 46: CP-09 ER70S-6 – Curto-Circuito



Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 47: CP-11 ER70S-G (Aristorod 38Zn) – Curto-Circuito



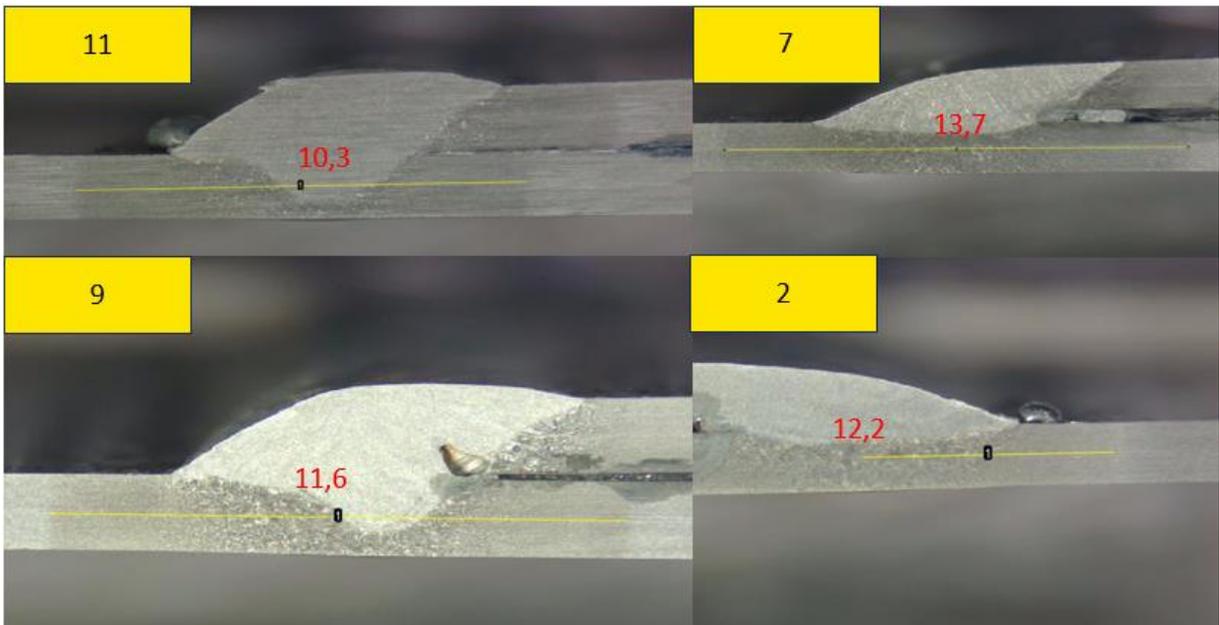
Fonte: Próprio autor (2023)

Na Figura 46, pode ser visto em ambas macrografias retiradas do corpo de prova CP-09 (ER70S-6 – Curto-Circuito) a presença de poro próximo a raiz do cordão, este é provável que tenha se formado a partir do vapor de zinco gerado durante o processo de soldagem. Nas demais macrografias não foram detectadas nenhuma descontinuidades.

Por fim, a ZTA estimada a partir das macrografias, mostrado na

Figura 48, possui comprimento até 30% maior no modo pulsado que no curto-circuito.

Figura 48: Medição linear da ZTA, CP02 – Medição aproximada por 50% do comprimento total



Fonte: Próprio autor. (2023)

4.3

4.4 Resultado de tração

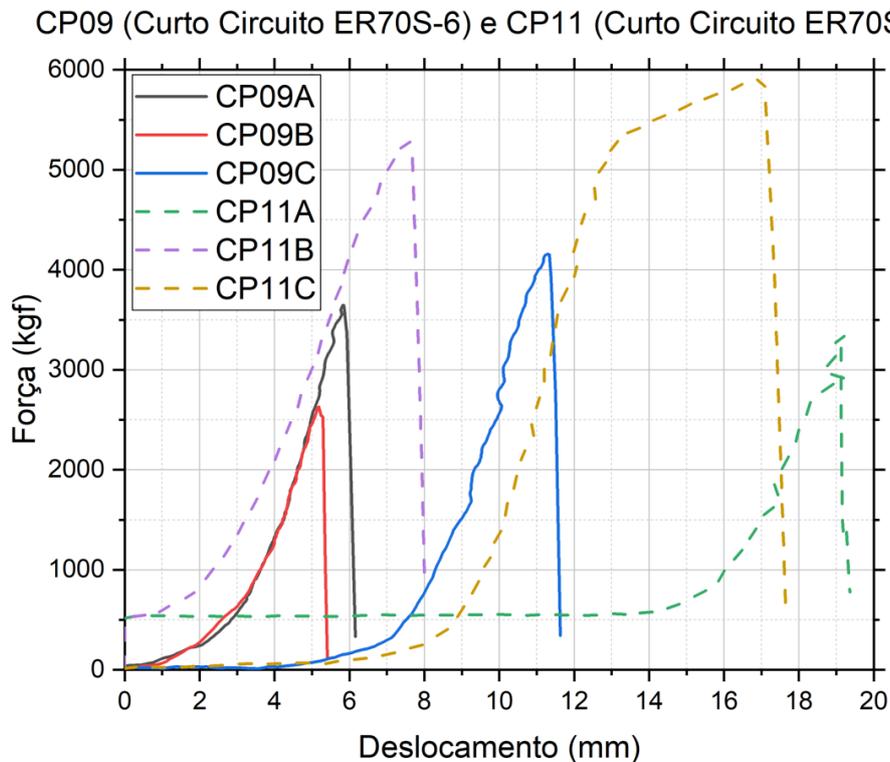
Tabela 14: Resultado do ensaio de tração transversal.

Consumível	Modo de transferência			
	Curto-circuito		Pulsado	
	Força máxima (média)	Deslocamento (médio)	Força máxima (média)	Deslocamento (médio)
ER70S-G (Aristorod 38Zn)	4219 (kgf)	15 (mm)	4811 (kgf)	9,42 (mm)
ER70S-6	3477 (kgf)	7,73 (mm)	4596 (kgf)	7,72 (mm)

Fonte: Próprio autor (2023)

A soldagem no modo de transferência pulsado apresentou maior força máxima e menor deslocamento médio quando comparado com a soldagem no modo de transferência por curto-circuito, em ambos os consumíveis. Isso indica que a soldagem através do modo pulsado produziu uma solda mais resistente e menos deformável quando comparado com a soldagem por curto-circuito, isto está relacionado ao aporte de calor do processo e consequentemente às características da ZTA e à geometria do cordão de solda.

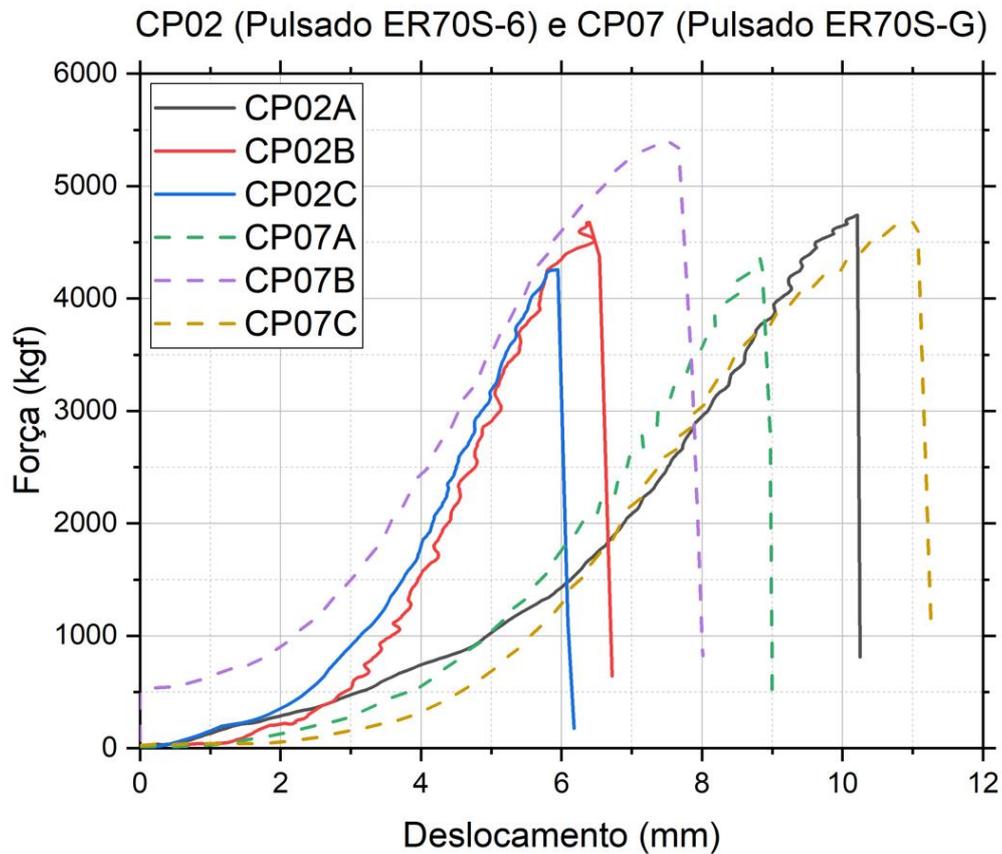
Figura 49: Gráfico de resultados dos ensaios de tração para o modo de transferência Curto-Circuito



Fonte: Próprio autor (2023)

Os resultados do ensaio de tração transversal em modo de transferência por curto-circuito, conforme Figura 50 e Tabela 14, mostraram que o arame ER70S-G (Aristorod 38Zn) obteve uma média de 4219 kgf de força máxima e 15 mm de deslocamento, enquanto o arame ER70S-6 obteve uma média de 3477 kgf de força máxima e 7,73 mm de deslocamento. Isso indica que o arame ER70S-G (Aristorod 38Zn) apresentou uma resistência mecânica de aproximadamente 21% maior e uma ductilidade de aproximadamente 94% maior em comparação com o arame ER70S-6. Essa diferença pode ser explicada pela composição química dos arames, que influencia na fluidez e na qualidade do metal de solda.

Figura 50: Gráfico de resultados dos ensaios de tração para o modo de transferência pulsado



Fonte: Próprio autor (2023)

Os resultados do ensaio de tração transversal no modo de transferência pulsado mostraram que o arame ER70S-G (Aristorod 38Zn) obteve uma média de 4811 kgf de força máxima e 9,42 mm de deslocamento, enquanto o arame ER70S-6 obteve uma média de 4596 kgf de força máxima e 7,72 mm de deslocamento. Isso indica que a junta soldada com o arame ER70S-G (Aristorod 38Zn) apresentou uma resistência mecânica de aproximadamente 4,7% maior e uma ductilidade, de aproximadamente 22% maior em comparação com o arame ER70S-6. Essa diferença pode ser explicada pela composição química dos arames, que influencia na fluidez e na qualidade do metal de solda.

A análise da fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração transversal revelou que a localização da ruptura foi na ZF, conforme Figura 51 e Figura 52, próxima à interface com o MB (linha de fusão), para todas as condições de soldagem avaliadas neste trabalho, ou seja, usando os consumíveis ER70S-6 e ER70S-G (Aristorod 38Zn), nos modos de transferência por curto-circuito e por pulso.

Isso significa que a ZF apresentou uma menor resistência mecânica do que o MB, isto era esperado uma vez que os consumíveis utilizados possuem propriedades mecânicas abaixo da do aço de alta resistência.

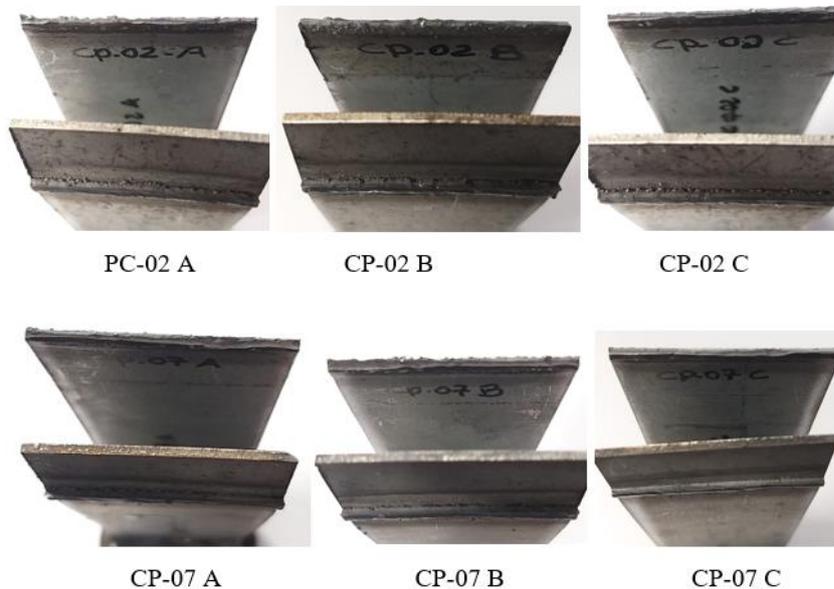
Figura 51: Região fraturada dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor (2023)

A ZTA, que corresponde à região do MB que sofreu alterações microestruturais devido ao ciclo térmico da soldagem, não foi a zona de rompimento dos corpos de provas, o que evidencia que, embora possa ter havido uma fragilização, não comprometeu a sua resistência ao ponto de ser menor que o metal de solda.

Figura 52: Corpos de prova fraturados, com foco na região de fratura (Pulsado)

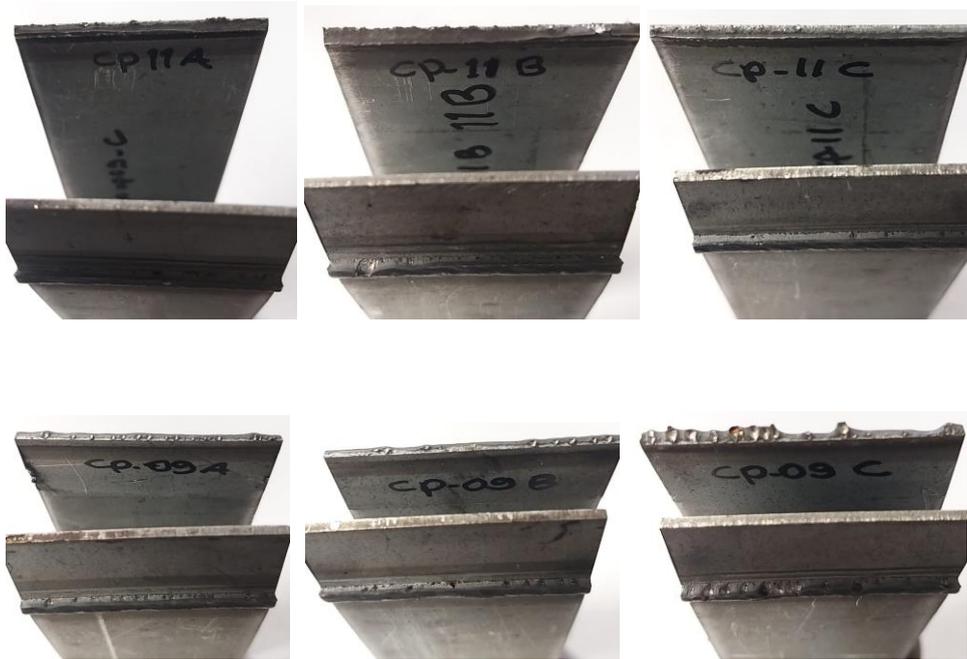


Fonte: Próprio autor (2023)

A análise comparativa das juntas soldadas com os arames ER70S-6 (CP-02 A, CP-02 B e CP-02 C) e ER70SG (CP-07 A, CP-07 B e CP-07 C) modo de transferência pulsado, revelou diferenças significativas na morfologia e na porosidade dos cordões de solda, conforme Figura

532. O arame ER70S-G (Aristorod 38Zn) resultou em cordões de solda com contornos bem definidos e poros menores e mais dispersos do que os produzidos com o arame ER70S-6. Essa melhoria na morfologia da solda contribui para uma maior resistência mecânica da junta, reduzindo a probabilidade de formação de trincas sob cargas mecânicas. A menor porosidade também aumenta a área efetiva da seção transversal da junta, melhorando sua capacidade de suportar cargas.

Figura 53: Corpos de prova fraturados, com foco na região de fratura (curto-circuito)



Fonte: Próprio autor (2023)

A análise comparativa das juntas soldadas com modo de transferência por curto-circuito com os arames ER70S-6 (CP-09 A, CP-09 B e CP-09 C) e ER70SG (CP-11 A, CP-11 B e CP-11 C), revelou diferenças significativas na morfologia e na porosidade dos cordões de solda. A junta soldada com o arame ER70S-6 exibiu maior irregularidade superficial e maior quantidade e tamanho de poros do que a junta soldada com o arame ER70SG. Além disso, os poros na junta soldada com o arame ER70S-6 apresentaram uma forma mais irregular e uma distribuição mais aglomerada do que os poros na junta soldada com o arame ER70SG. Essas discontinuidades comprometem a resistência mecânica da junta, pois atuam como concentradores de tensão e facilitam a propagação de trincas sob solicitações mecânicas. Além disso, a porosidade reduz a área efetiva da seção transversal da junta, diminuindo a sua capacidade de suportar cargas.

4.5 Análise dos resultados

Neste estudo comparativo utilizando os arames: ER70S-G (OK AristoRod 38Zn) e ER70S-6 (standard), utilizando os modos de transferência metálica pulsado e o curto-circuito. Os critérios de avaliação dos processos foram baseados na porosidade interna e externa, na quantidade de respingos, na facilidade de operação, na aparência do cordão de solda, e nos resultados de propriedades mecânicas.

Embora a resolução dos ensaios radiográficos realizados não tenha sido suficiente para determinar a quantidade exata de poros em cada solda, os resultados obtidos são consistentes com as macrografias, o ensaio de tração e a avaliação das superfícies fraturadas.

Os resultados indicam que o processo de soldagem pulsado com o arame ER70S-G (Aristorod 38Zn) apresentou o melhor desempenho geral, seguido pelo processo de soldagem em curto-circuito também com o arame ER70S-G (Aristorod 38Zn). A

Tabela 15 mostra a pontuação os resultados obtidos.

Figura 54: Avaliação juntas soldadas

CP-02 ER70S-6 Pulsado		Alta densidade de respingos finos, e baixa porosidade visível ao longo do cordão
CP-07 ER70S-G Pulsado		Baixa quantidade de respingos finos, e poucos pontos dispersos de poros visíveis.
CP-09 ER70S-6 Curto-Circuito		Respingos finos de intensidade moderada e porosidade pontual dispersa ao longo do Cordão.
CP-11 ER70S-G Curto-Circuito		Poucos respingos finos a intensidade moderada e pouco poros dispersos ao longo do Cordão.

Fonte: Próprio autor (2023)

Tabela 15: Análise qualitativa dos resultados de soldagem em cada cenário proposto

Critério*	ER70S-G Pulsado	ER70S-6 Pulsado	ER70S-G curto-circuito	ER70S-6 curto-circuito
Controle da Porosidade interna	+++	+	++	+
Controle da Porosidade externa	+++	++	+++	+++
Controle dos Respingos	++++	+	+++	++
Soldabilidade	++++	+++	+++	++
Visual do cordão de solda	+++	++	+++	+++
Propriedades mecânicas	++++	+++	+++	++

Média final	3,5	2,0	2,8	2,1
-------------	-----	-----	-----	-----

*Escala: + = Regular, ++ = Bom, +++ = ótimo, ++++ = excelente

Fonte: Próprio autor (2023)

5 CONCLUSÃO

O estudo em questão apresentou um método comparativo entre dois arames destinados à soldagem GMAW utilizando chapas eletro galvanizadas de um aço de 3^o geração, de ultra alta resistência mecânica (1000Mpa), desenvolvido para o setor automotivo e produzido em uma indústria nacional, utilizando parâmetros de soldagem gêmeos em dois modos de transferência metálica, curto-circuito e pulsado. O arame ER70S-G (OK AristoRod 38Zn) reduziu significativamente a porosidade nos cordões de solda quando comparado ao arame ER70S-6 (standard), em ambos os modos de transferência metálica, chegando reduções superiores a 20% na quantidade total de porosidade interna e externa para as juntas soldadas com o arame ER70S-G. O arame ER70S-G também apresentou índices inferiores de respingos em ambos os modos de transferência, pulsado e curto-circuito, em relação ao arame ER70S-6.

As juntas soldadas com o arame ER70S-G utilizando o modo de transferência por curto-circuito apresentaram uma resistência mecânica superior às juntas soldadas com o arame ER70S-6. Em média, houve um aumento de 21% na resistência mecânica e 94% em ductilidade.

Na soldagem utilizando o modo de transferência pulsado, o arame ER70S-G apresentou um aumento de aproximadamente 4,7% na resistência mecânica e 22% de ductilidade em comparação com o arame ER70S-6. Desta forma, as juntas soldadas com o arame ER70S-G apresentaram resultados superiores às juntas soldadas com o arame ER70S-6.

A composição química microligada e rigidamente controlada do arame ER70S-G (OK AristoRod 38Zn) ajuda na desgaseificação, permitindo maior facilidade para que o vapor de zinco escape, reduzindo consideravelmente o aprisionamento do vapor de zinco no metal de solda. Isso resulta em menos descontinuidades e promove um metal de solda mais íntegro com resultados de resistência e ductilidade superiores ao arame ER70S-6 (standard) para os dois modos de transferência, pulsado e curto-circuito.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 11888-1 - Aços de alta resistência - Parte 1: Classificação e terminologia. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=421674>>. Acesso em: 05 abr. 2023.

AÇOS BIFÁSICOS (DP): excelente ductilidade e absorção de energia. <https://www.ssab.com/pt-br/marcas-e-produtos/docol/graus-de-aco-automotivo/acos-bifasicos>
Acesso em: 11/2023

ASM Handbook. 8: Mechanical testing and evaluation. ASM International, 2000.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Volume V, Nondestructive Examination. 2023.

BRACARENSE, Alexandre Q. "Gas metal arc welding." Disponível no site (2003)

BRACARENSE, Alexandre Q., Curso especialização em Engenharia de soldagem, 2022, Notas de aula.

COLPAERT, Hubertus et al. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Editora Blucher, 2008.

COSTA, Lucas Manoel Leandro. Influência da concentração gasosa da mistura hélio e argônio nos processos de soldagem de cobre. 2021

DALTRO, Adnauer Tarquínio. Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa em juntas de chapas finas de aço. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

EASAB. Melhores práticas para soldagem de materiais finos. 2023. Disponível em: <https://esab.com/br/sam_pt/esab-university/articles/best-practices-for-welding-thin-materials/> Acesso em: 20 nov. 2023.

ELISEI, Cristina de Carvalho Ares - Carvalho Ares Elisei.- Caracterização mecânica e microestrutural de um aço de baixo carbono . Guaratinguetá s.n., 2008

ESAB. OK AristoRod 38 Zn - Arame sólido para aços galvanizados e Zn/Ni revestidos. Disponível em: 7. Acesso em: 14 out. 2023.

FERREIRA FILHO, Demostenes et al. Influência do gás de proteção na soldagem MIG/MAG do aço inoxidável ferrítico com arames ferríticos. 2007.

HALVERSON CTS. Welding Procedures, 2023. Disponível em: <<http://www.halversoncts.com/97-welding-procedures.html>>. Acesso em nov de 2013.

HAO, Yu et al. The evaporation behavior of zinc and its effect on spattering in laser overlap welding of galvanized steels. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 306, p. 117625, 2022.

ICZ. Aço galvanizado por imersão a quente aumenta a vida útil de obras de infraestrutura em aço, 2014. Disponível em: <<https://www.icz.org.br/noticias-detalhes.php?cod=4638>>. Acesso em 17 de dez de 2023.

ICZ. Fundamentos da Galvanização a fogo, 2023. Disponível em: <<https://hotmart.com/pt-br/marketplace/produtos/fundamentos-da-galvanizacao-a-fogo/K75602721S>>. Acesso em nov de 2013.

INFOSOLDA. Soldagem robotizada, 2023. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/223-soldagem-robotizada/>>. Acesso em nov de 2013.

INFOSOLDA. Terminologia em Soldagem, 2023. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/inspecao/terminologia-em-soldagem.pdf>>. Acesso em nov de 2013.

JOSEPH, Andy et al. Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet. 2003.

KODAMA, Shinji et al. Development of stainless steel welding wire for galvanized steel sheets. *Welding in the World*, v. 54, p. R42-R48, 2010.

MARQUES, Paulo Villani. Soldagem-fundamentos e tecnologia. Editora UFMG, 2005.

MATERIAL WELDING. Welding Spatter: Causes & Remedies, 2023. Disponível em: <<https://www.materialwelding.com/welding-spatter-causes-remedies/>> Acesso em nov de 2013.

MAXWELL. O Maxwell em Números, 2023. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/>> Acesso em nov de 2013.

MFAB 7A (Descontinuidades em Soldagem) Prof. Ariel Rodriguez Arias. 2022

MIRANDA, Victor H., DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DO PROCESSO GMAW. 2021

MODENESI, P. J. Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas. Soldagem, Belo Horizonte, 2001.

MODENESI, Paulo J. Introdução à Física do Arco Elétrico Soldagem I. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

MODENESI, Paulo J. Soldagem I Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldas. Belo Horizonte, 2001.

MODENESI, Paulo J. Terminologia usual de soldagem e símbolos de soldagem. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2008.

MODENESI, Paulo J. Transferência de Metal na Soldagem GMAW https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/Prat_Transf_Metal.pdf Acesso em: 11/2023.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Fontes de energia para a soldagem a arco. Departamento de engenharia, 2009.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

NARAYANAN, Badri K. et al. Solutions for welding zinc-coated steels. In: Proc. Conf. Sheet Metal Welding Conference XVI, Livonia, MI, USA. 2014.

NASCIMENTO, Alexandre Saldanha do et al. Fenomenologia da soldagem MIG/MAG-PV e sua aplicabilidade para juntas sobreposta e em V (passe de raiz). 2011.

NORMA, D. I. N. EN ISO 6520-1: 2007,,,. Welding and allied processes–Classification of geometric imperfections in metallic materials, 2007.

NORMAS, U. N. E. UNE-EN ISO 5817: 2004. Uniones soldadas por arco de aceros. Guía sobre los niveles de calidad en función de las imperfecciones, 2004.

OLIVEIRA, Isadora Fernandes Costa de. Avaliação da soldabilidade do aço dual-phase 980 ao processo GTAW. 2021.

RODRIGUES, Clóvis et al, Soldagem na indústria do petróleo. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2022.

SAE International. SAE J2745 - Automotive Advanced High Strength Steel (AHSS) Classification and Nomenclature. Disponível em: >https://www.sae.org/standards/content/j2745_202101/. Acesso em: 05 abr. 2023.

SANTOS, T. F.; MODENESI, P. J.; GOMES, R. M.; BRACARENSE. Influência do tipo de arame na soldagem GMAW de aços galvanizados. Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, 19., 2006, Foz do Iguaçu. ABM, 2006. p. 5142-5151.

SOUZA JUNIOR, Soldagem GMAW em chapas finas de aço galvanizado com baixo teor de silício no arame. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 365-374, out./dez. 2011.

WEMAN, Klas; LINDÉN, Gunnar (Ed.). MIG welding guide. Woodhead Publishing, 2006.

WIKISOLDA. Juntas e terminologia de soldagem, 2019.
<<https://www.wikisolda.com.br/2019/08/tipos-de-juntas-terminologia-de-soldagem.html>
>Acesso em: 11/2023

WORLDAUTOSTEEL. Advanced High-Strength Steel (AHSS) Definitions. Disponível em:
<<https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-advanced-high-strength-steel-ahss-definitions/>>. Acesso em: 05 abr. 2023.