

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação Curso de Especialização de Soldagem

Roque Alexandre de Oliveira Zucas

ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDAGEM GMAW EM AÇOS GALVANIZADOS

Belo Horizonte
2025

Roque Alexandre de Oliveira Zucas

ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDAGEM GMAW EM AÇOS GALVANIZADOS

Monografia de especialização apresentada ao Programa de Pós-Graduação Curso de Especialização em Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Tecnologia e Qualificação em Soldagem.

Orientador: Profº Ariel Rodriguez Arias

Belo Horizonte
2025



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



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 04 de Dezembro de 2025, às 10:30 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDAGEM GMAW EM AÇOS GALVANIZADOS

Nome Completo Aluno: Roque Alexandre de Oliveira Zucas

Nº da Matrícula na UFMG: 2024672242

Local: Sala 03 Escola de Engenharia UFMG.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 20 minutos e após ter arguido o(a) candidato(a) por 10 minutos, é de parecer **FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 95 e **SEM** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 0 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador **Ariel Rodriguez Arias**.

Assinaturas:

Ariel Rodriguez Arias
Engenharia da UFMG
Orientador

Ariel Rodriguez Arias
Engenharia da UFMG
Avaliador

Documento assinado digitalmente
ROQUE ALEXANDRE DE OLIVEIRA ZUCAS
Data: 2025.12.04 10:30:00
URL: https://www.sigint.ufmg.br

Roque Alexandre de Oliveira Zucas
33978300877

A Deus e a Jesus Cristo toda Honra e Glória.
Dedico este trabalho a minha esposa Paula e ao meu filho Enzo que, com muito amor, incentivo e paciência, me apoiaram e me fizeram alcançar esse objetivo, estando sempre junto comigo principalmente nos momentos mais difíceis.

RESUMO

Este estudo investiga e compara o desempenho dos arames maciços de diâmetro 0,9 mm, AWS 5.18 ER70S-6 e AWS 5.18 ER70S-3 na soldagem robotizada de aço galvanizado, utilizando o processo de soldagem Gas Metal Arc Welding (GMAW) no modo de transferência por curto-circuito. Foi empregada uma mistura gasosa composta por 80% de argônio e 20% de CO₂ (mistura 80/20), mantendo-se constantes todos os parâmetros de processo para ambos os tipos de arame, a fim de garantir uma comparação confiável, e observar somente o comportamento do processo e os resultados obtidos através da mudança de arame e suas respectivas composições químicas, com o objetivo de se observar o efeito Marangoni. A avaliação incluiu inspeções visuais para verificar o grau de degradação da camada de zinco, a formação de poros e o nível de respingos, além de medições dimensionais, análises macrográficas dos cordões de solda e ensaio de corrosão e envelhecimento acelerado por exposição à névoa salina (Salt Spray). Os resultados demonstraram que o processo GMAW com o arame ER70S-3 apresentou desempenho superior em termos de aspecto visual do cordão, consistência de penetração, resultados ensaio de corrosão e envelhecimento acelerado por exposição à névoa salina (Salt Spray) e menor distorção das peças soldadas.

Palavras-chave: soldagem; aços galvanizados, soldagem GMAW, ER70S-6, ER70S-3, efeito marangoni

ABSTRACT

This study investigates and compares the performance of solid wires with a diameter of 0.9 mm, AWS 5.18 ER70S-6 and AWS 5.18 ER70S-3, in the robotic welding of galvanized steel using the Gas Metal Arc Welding (GMAW) process in short-circuit transfer mode. A shielding gas mixture composed of 80% argon and 20% CO₂ (80/20 mixture) was employed, with all process parameters kept constant for both wire types to ensure a reliable comparison and to observe only the process behavior and the results obtained through the change of wire and their respective chemical compositions, aiming to analyze the Marangoni effect. The evaluation included visual inspections to verify the degree of degradation of the zinc layer, pore formation, and spatter levels, as well as dimensional measurements, macrographic analyses of the weld beads, and corrosion and accelerated aging tests through exposure to salt spray. The results demonstrated that the GMAW process with ER70S-3 wire showed superior performance in terms of weld bead appearance, penetration consistency, corrosion and accelerated aging test results under salt spray exposure, and lower distortion of the welded parts.

Keywords: welding; galvanized steels; GMAW welding; ER70S-6; ER70S-3; Marangoni effect

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Efeito da variação da tensão superficial com a temperatura na ausência de elementos tenso-ativos na poça de fusão.....	13
Figura 2 - Efeito da variação da tensão superficial com a temperatura na presença de elementos tenso-ativos na poça de fusão.....	14
Figura 3 - Junta Sobreposta.....	14
Figura 4 - Junta de Aresta.....	14
Figura 5 – Junta de Aresta.....	14
Figura 6 – Junta de Topo.....	15
Figura 7 – Junta de Ângulo.....	15
Figura 8 – Imagem do Componente que será soldado.....	15
Figura 9 – Região onde os filetes de solda irão ser realizados.....	15
Figura 10 – Fonte de Soldagem Yaskawa Motoweld SR 350.....	15
Figura 11 – Robô de Soldagem Yaskaewa Motoman.....	15
Figura 12 - Gráfico de Variáveis Elétricas, apresentando Tensão (em vermelho), Corrente (em Preto) e Velocidade de Alimentação de Arame (em Verde). Modo de transferência por Curto-Circuito.....	16
Figura 13 - : Gráfico de Variáveis Elétricas, com maior detalhamento das variáveis do processo, apresentando Tensão (em vermelho), Corrente (em Preto) e Velocidade de Alimentação de Arame (em Verde). Modo de transferência por Curto-Circuito.....	17
Figura 14 - Análise dimensional de um dos corpos de prova soldados com ER0S-3. Resultado dentro da tolerância de aprovação	18
Figura 15 - Análise dimensional de um dos corpos de prova soldados com ER0S-6. Resultado dentro da tolerância de aprovação, porém, nota-se uma variação (em azul) maior causada pela energia de soldagem.....	19
Figura 16 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	20
Figura 17 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	21
Figura 18 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	21
Figura 19 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	22
Figura 20 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	22
Figura 21 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S6.....	23
Figura 22 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	23
Figura 23 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	24
Figura 24 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	24
Figura 25 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	25
Figura 26 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	25

Figura 27 - Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.....	26
Figura 28 - Solda de número 11, do corpo de prova 3, soldado com ER70S3, que apresentou penetração insuficiente.....	26
Figura 29 - Filetes de número 16, 17 e 18. Presença de Porosidade no cordão 17 feito com o arame ER70S6.....	28
Figura 30 - Filetes de número 2, 3, 4, 5, 7 e 8. Presença de Porosidade no cordão 7 feito com o arame ER 70S6.....	28
Figura 31 - Filetes de número 12 e 13. Nota-se uma maior queima da área galvanizada no componente soldado com ER70S6.....	29
Figura 32 - Filetes de número 10 e 11. Nota-se uma maior queima da área galvanizada no componente soldado com ER70S6.....	29
Figura 33 - Equipamento de Ensaio e posicionamento de amostra.....	30
Figura 34 - Corpos de prova que forma submetidos ao ensaio de Salt Spray.....	30
Figura 35 - Resultados obtidos após 72 horas de Salt Spray, onde houve corrosão de zinco (branca) e corrosão do metal base (vermelha) Aqui, o corpo de prova soldado com ER70S-6 começou a apresentar pontos de oxidação vermelhos (metal base) na área de ZTA dos cordões de solda.....	31
Figura 36 - Resultados obtidos após 96 horas de Salt Spray. Aqui, o corpo de prova soldado com ER70S-3 começou a apresentar pontos de oxidação vermelhos (metal base) na área de ZTA dos cordões de solda.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química dos Consumíveis ER70S-3 e ER70S-6, conforme ASME II part C SFA-5.18 [1].....	12
Tabela 2 - Variáveis do processo de soldagem para execução do componente.....	16
Tabela 3 - Valores médios obtidos na soldagem com arame ER70S3.....	27
Tabela 4 - Valores médios obtidos na soldagem com arame ER70S6.....	27
Tabela 5 - Comparação entre a Penetração obtida entre os arames ER70S3 e ER70S3.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASNT	American Society for Testing and Materials
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
BM	Base Metal – Metal de Base
GMAW	Gas Metal Arc Welding – Soldagem à Arco com Gás e Metal
WM	Weld Metal – Metal de Solda
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1. Introdução.....	12
2. Materiais e Métodos.....	16
3. Resultados e Discussões.....	19
3.1. Ensaio Dimensional.....	17
3.2. Macrografias.....	21
3.3. Análise e Aspecto Visual da Solda.....	29
3.4. Ensaio de corrosão e envelhecimento acelerado por exposição à névoa salina (Salt Spray).....	30
4. Conclusão.....	33
5. Agradecimentos.....	33
6. Referências.....	33
7. Responsabilidade Autoral.....	34

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por veículos mais duráveis, seguros e ambientalmente sustentáveis tem impulsionado o uso de aços galvanizados na indústria automotiva. Esse tipo de aço, recoberto por uma camada de zinco, oferece proteção eficiente contra a corrosão atmosférica, sendo especialmente eficaz em ambientes agressivos, como regiões litorâneas ou áreas expostas a sal nas estradas. Além de atuar como barreira física, o zinco fornece proteção catódica ao aço base, prevenindo a oxidação localizada mesmo em caso de danos superficiais.

O emprego de aços galvanizados tem impacto direto na longevidade dos veículos e na redução de custos com manutenção e garantia, uma vez que a corrosão é uma das principais causas de falhas estruturais e perda de valor de mercado. Em paralelo, a integridade estrutural proporcionada por esse material ao longo do tempo contribui para manter os padrões de segurança veicular, especialmente em zonas de deformação programada.

Além dos benefícios técnicos e econômicos, os aços galvanizados contribuem para os objetivos ambientais do setor, sendo totalmente recicláveis e alinhados com políticas de redução da pegada de carbono. A aplicação estratégica desses materiais em componentes como painéis de portas, longarinas, colunas estruturais e caixas de roda tem se consolidado como uma solução eficiente para atender às exigências normativas de durabilidade, desempenho estrutural e sustentabilidade.

Neste contexto, compreender o comportamento dos aços galvanizados durante o processo de soldagem é essencial para a otimização de projetos e aprimoramento da qualidade final dos componentes soldados e do produto final, o veículo automotivo.

A soldagem de aços galvanizados apresenta uma série de desafios técnicos associados principalmente à presença da camada de zinco, a qual é fundamental para a proteção anticorrosiva, mas interfere significativamente na estabilidade do processo de soldagem e na qualidade da junta. O zinco possui ponto de ebulição relativamente baixo (aproximadamente 907 °C), o que faz com que vaporize rapidamente quando submetido às temperaturas elevadas do arco elétrico (~3.000 a 6.000 °C), características típicas dos processos de soldagem por arco.

A rápida vaporização do zinco durante a soldagem pode causar a formação de porosidade no cordão, uma vez que o gás gerado tende a ficar retido na poça de fusão antes da solidificação. Isso compromete tanto a resistência mecânica quanto a estanqueidade da junta, fatores críticos em aplicações automotivas e estruturais. Além disso, a presença de vapores metálicos no entorno do arco pode desestabilizar o processo, aumentando significativamente a incidência de respingos, falhas de ignição e oscilações de comprimento de arco, exigindo maior controle operacional e retrabalho posterior.

Outro aspecto relevante é a dificuldade de fusão nas interfaces entre o metal de base e o metal de adição, o que pode resultar em falta de fusão, penetração irregular ou descolamento da solda. Isso se torna especialmente problemático em soldagens por curto-circuito, nas quais a tensão de arco e a energia térmica são mais baixas. A reatividade do zinco com elementos do arame de solda também pode levar à formação de inclusões não metálicas e à contaminação da zona fundida, afetando negativamente as propriedades mecânicas da junta.

Com base nessas premissas, o estudo apresenta nos apresentou também as diferenças de resultados obtidos com os consumíveis de soldagem de diâmetro de 0,9 mm ER70S-6 e ER70S-3, onde embora as propriedades mecânicas dos metais de solda obtidos com estes consumíveis sejam bastante semelhantes, suas composições químicas diferem, especialmente nos teores de elementos desoxidantes, como silício (Si) e manganês (Mn). O teor de desoxidantes é menor no ER70S-3 comparado ao ER70S-6. O teor de desoxidantes Si e Mn é menor no ER70S-3 comparado ao ER70S-6.

Tabela 1 – Composição Química dos Consumíveis ER70S-3 e ER70S-6, conforme ASME II part C SFA-5.18

[1]

Classificação AWS S.18 [AS.18M]	UNS Number	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Zr	Al
ER70S-3 [ER495-3]	K11022	0,06 até 0,15	0,90 até 1,40	0,45 até 0,75	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	-	-	-
ER70S-6 [ER495-6]	K11140	0,06 até 0,15	1,40 até 1,85	0,80 até 1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	-	-	-

Dentro do contexto que iremos trabalhar nesse artigo soldando os componentes no processo GMAW em transferência por curto-circuito, podemos considerar que, segundo Wang e Tsai [7], a formação e o destacamento da gota metálica são governados pela interação de diversas forças. Segundo Wang e Tsai [7], de acordo com a força eletromagnética de contração (pinch), intensificada durante o pico de corrente no curto, atua radialmente comprimindo o pescoço da gota até provocar sua separação. A tensão superficial busca manter a gota unida ao arame, enquanto gradientes dessa tensão — conhecidos como efeito Marangoni, influenciados por temperatura e composição superficial (S e O) — direcionam o fluxo metálico dentro do banho, afetando a largura e a penetração do cordão. O peso da gota auxilia no destacamento quando o pescoço é afinado, e o campo elétrico do arco exerce força eletrostática que alonga a gota em direção à poça. Além disso, a pressão dinâmica do plasma e as correntes

de convecção térmica contribuem para a movimentação do metal líquido. O equilíbrio temporal entre essas forças determina a estabilidade do arco, a quantidade de respingo e a penetração obtida na solda.

Uma compreensão aprofundada do efeito Marangoni torna-se fundamental para entender o comportamento da poça de fusão a fim de se realizar a escolha adequada entre os arames ER70S-3 e ER70S-6, de acordo com o nível de oxidação do material base.

O efeito Marangoni é a transferência de massa ao longo da interface entre dois fluidos, causada por um gradiente de tensão superficial. Quando essa variação está relacionada à temperatura, o fenômeno pode ser denominado convecção termo-capilar [2].

Segundo Vicente[3], como um líquido com alta tensão superficial exerce maior força sobre o líquido ao seu redor do que um líquido com baixa tensão superficial, a presença de um gradiente de tensão superficial naturalmente induz o fluxo do líquido para longe das regiões de menor tensão superficial. Esse gradiente pode ser causado por diferenças de concentração ou por um gradiente de temperatura, quando a tensão superficial é função da temperatura [2].

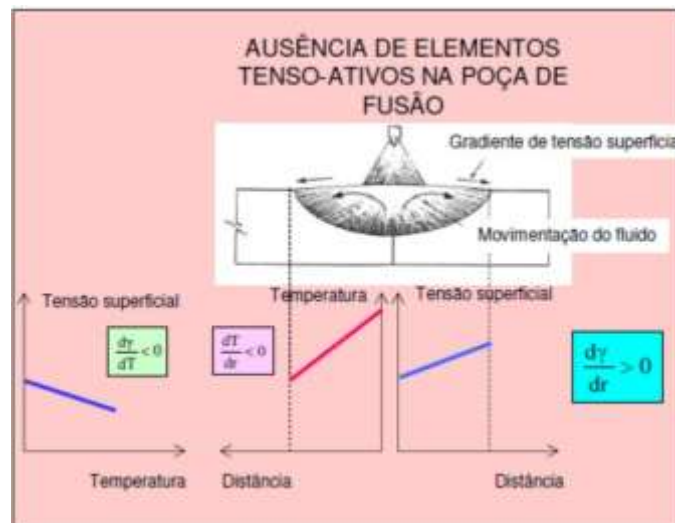


Figura 1: Efeito da variação da tensão superficial com a temperatura na ausência de elementos tenso-ativos na poça de fusão.

O fluxo de fluido na poça de fusão determina o formato da solda no processo GMAW, e a força motriz desse fluxo é o gradiente de tensão superficial — fenômeno conhecido como convecção de Marangoni.

Metais puros (ou materiais com baixo teor de enxofre) apresentam um coeficiente negativo de temperatura para a tensão superficial. Quando a área sob o arco é aquecida, a tensão superficial diminui no centro da poça, fazendo com que o fluxo de fluido ocorra do centro para as bordas [9–12].

Por outro lado, quando enxofre, oxigênio, selênio ou outros elementos ativos de superfície são introduzidos na poça de fusão mesmo em baixas concentrações, eles provocam um aumento da tensão superficial com o aumento da temperatura. Nessa condição, o fluxo de fluido passa a ocorrer das bordas da poça (onde a tensão superficial é menor) para o centro, o que aumenta a penetração da solda [9–13].

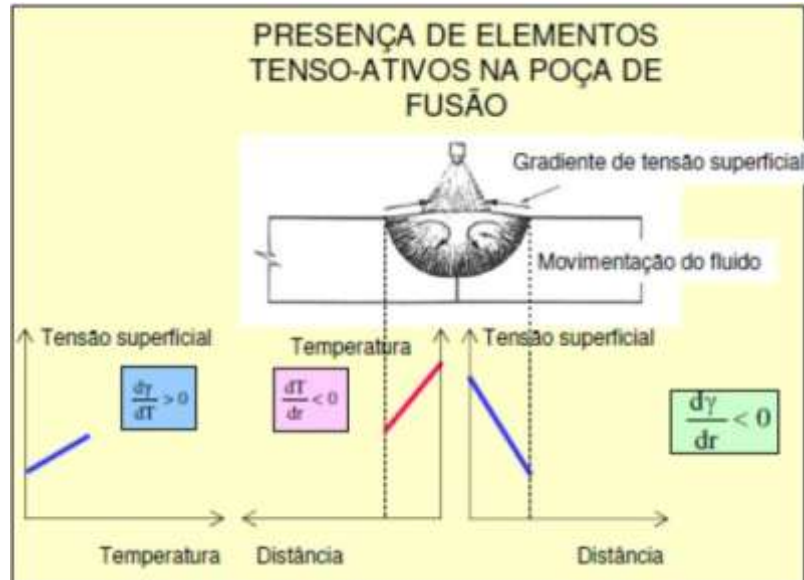
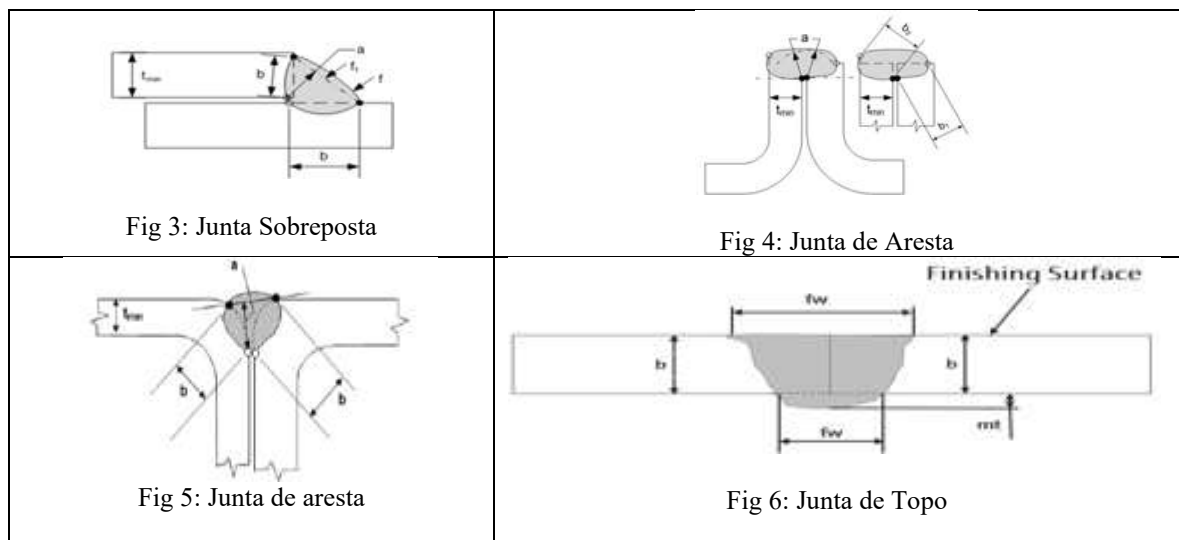


Figura 2: Efeito da variação da tensão superficial com a temperatura na presença de elementos tenso-ativos na poça de fusão.

A Figura 1 apresenta o efeito da variação da tensão superficial com a temperatura na presença de elementos ativos de superfície na poça de fusão, enquanto a Figura 2 apresenta o efeito da variação da tensão superficial com a temperatura na ausência de elementos ativos de superfície na poça de fusão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos testes, foi realizado a soldagem de 12 componentes soldados, ambos de aço ao carbono galvanizados. Um dos componentes tem espessura de 1,8 mm e o outro 0,8 mm. A junta a ser soldada é uma junta sobre-posta, e cada componente deste tem 12 filetes de solda. O processo de soldagem utilizado é o GMAW, modo de transferência por curto circuito, com gás de proteção mistura de 80% de Argônio e 20% de CO₂, sendo um componente soldado com o arame ER70S-6 e o outro com o arame ER70S-3. As juntas da peça que soldamos esta detalhadas abaixo:



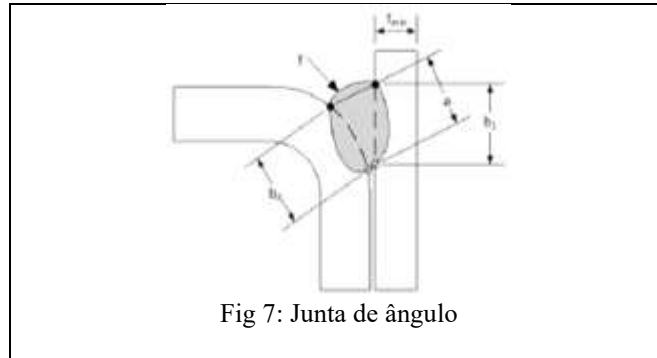


Figura 8: Imagem do componente que será soldado

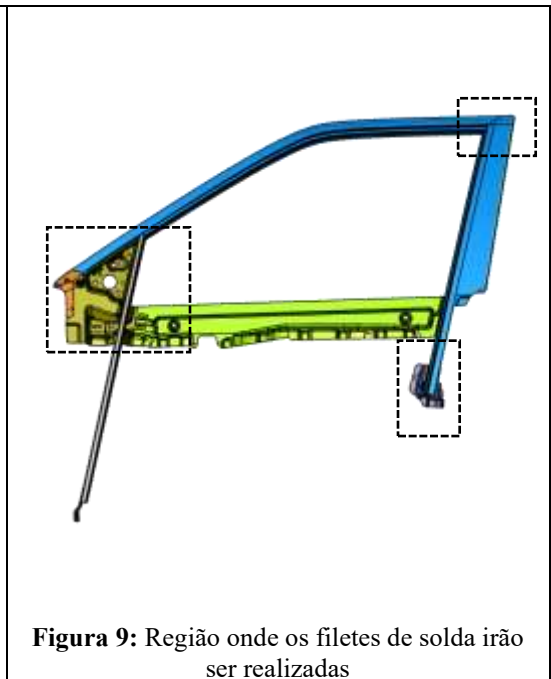


Figura 9: Região onde os filetes de solda irão ser realizadas



Figura 10: Fonte de soldagem Yaskawa MOTOWELD SR350



Figura 11: Robô de Soldagem Yaskawa Motoman

As variáveis de processo que foram utilizadas para esta atividade, sendo que os parâmetros não foram alterados entre nenhuma das peças, estão detalhadas na tabela 2:

DelayBy	WeldID	StringID	Weld Label	Date	Time	Cell	Name	Network	Type	Duração (s)	Tensão (V)	Corrente (A)	VAA (MPM)	VS (mm/seg)	HF(KJ/mm ³)
Newest	After-Clamp	05/22/25	11:47:18A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,7	17,4	125	6	40	3,26
1	After-Clamp	05/22/25	11:47:15A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,3	17,2	128	6	45	2,94
2	After-Clamp	05/22/25	11:47:12A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,8	17,3	125	6	45	2,88
3	After-Clamp	05/22/25	11:47:08A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,7	16,7	134	6	45	2,98
4	False-Arc	05/22/25	11:47:05A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	0,1	43,3	16	2	45	0,92
5	After-Clamp	05/22/25	11:47:03A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,7	15,6	153	6	45	3,18
6	After-Clamp	05/22/25	11:46:59A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,5	18,2	131	6	45	3,18
7	After-Clamp	05/22/25	11:46:55A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	3,6	16,9	130	6	40	3,30
8	After-Clamp	05/22/25	11:46:50A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	3,2	18,8	76	3	35	2,45
9	After-Clamp	05/22/25	11:46:45A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	3,3	18,7	78	3	30	2,92
10	After-Clamp	05/22/25	11:46:39A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,6	16,9	67	3	35	1,94
11	After-Clamp	05/22/25	11:46:37A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,7	16,9	64	3	35	1,85
12	After-Clamp	05/22/25	11:46:34A Network	Insight		2 Miller	ArcAgent	Auto	GMAW	1,1	17	65	3	35	1,89

Tabela 2: Variáveis do processo de soldagem para execução do componente

Abaixo, detalhamento das variáveis elétricas (Tensão e Corrente) e da Velocidade de Alimentação de Arame (VAA), obtidos através do sistema de Monitoramento ARC Agent® e software Insight Centerpoint® da empresa Miller Electric:

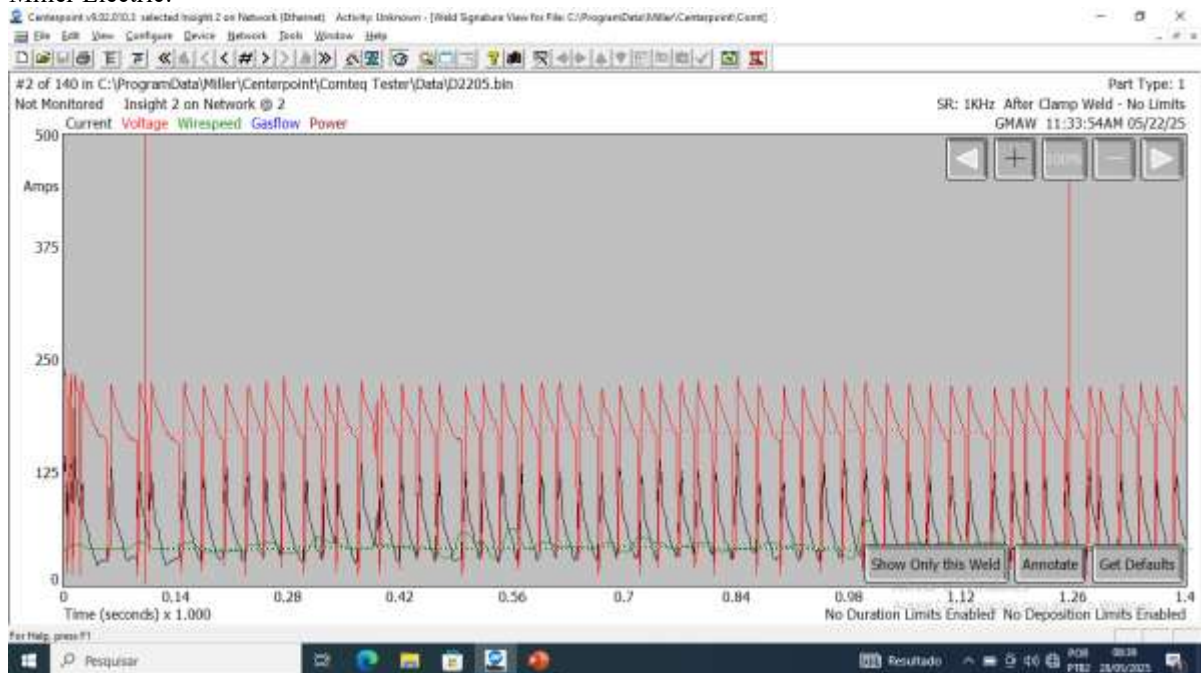


Figura 12: Gráfico de Variáveis Elétricas, apresentando Tensão (em vermelho), Corrente (em Preto) e Velocidade de Alimentação de Arame (em Verde). Modo de transferência por Curto-Circuito;

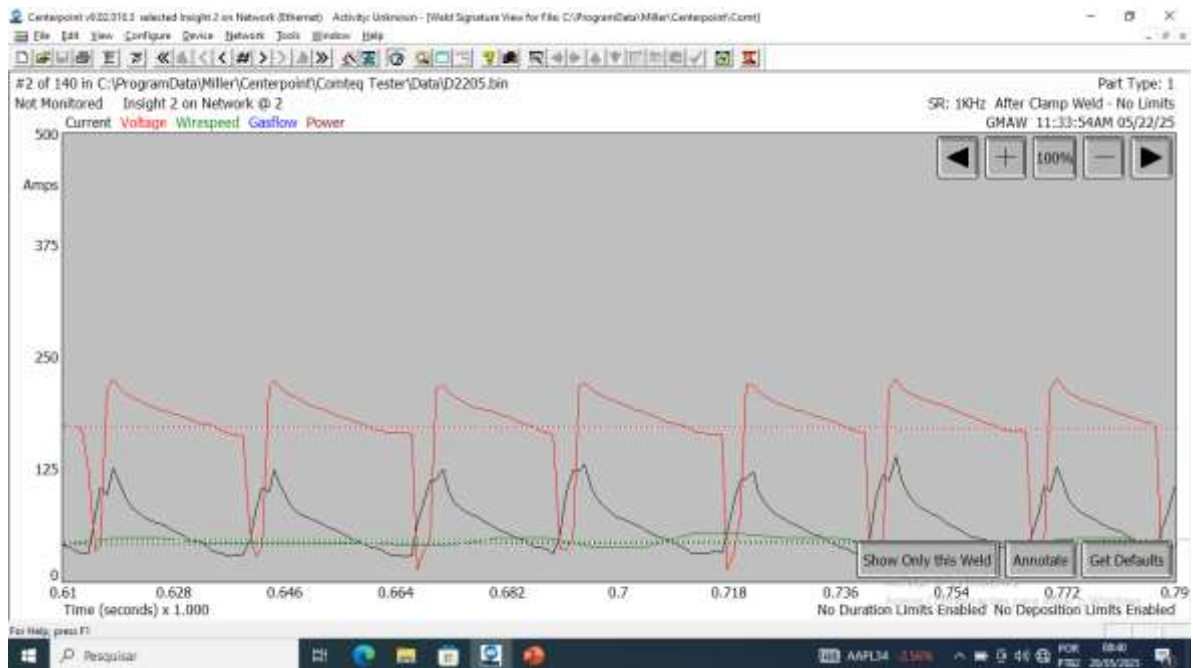


Figura 13: Gráfico de Variáveis Elétricas, com maior detalhamento das variáveis do processo, apresentando Tensão (em vermelho), Corrente (em Preto) e Velocidade de Alimentação de Arame (em Verde). Modo de transferência por Curto-Circuito;

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio Dimensional (nível de deformações)

Os componentes soldados foram submetidos a uma análise dimensional por scanner 3D no equipamento da Hexagon, para verificar se as tolerâncias de deformação máxima e mínima foram respeitadas, e esse aspecto é crítico, pois trata-se de peças de aparência — visíveis ao cliente final, como os gaps entre as portas de veículos. Qualquer variação fora da especificação compromete não apenas a estética, mas também a percepção de qualidade e o ajuste de montagem na linha de produção. As normas que foram usadas para referência e validação foram a GMW14058 (General Motors) [4] e Engineering Standard MS181-13 (Hyundai Motors) [5].

Abaixo, um exemplo de avaliação feita com o arame ER70S-3 e outro com o arame ER 70S6.

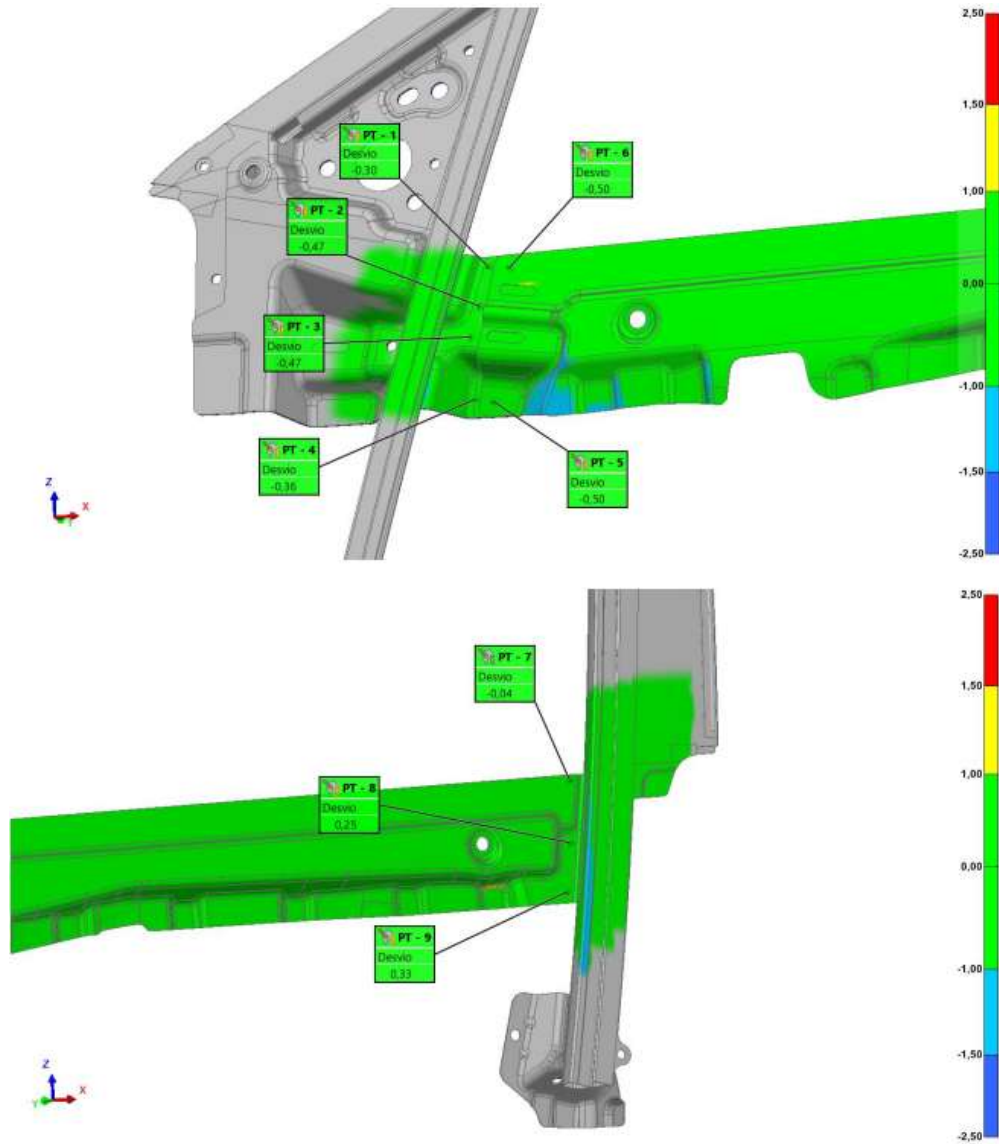


Figura 14: Análise dimensional de um dos corpos de prova soldados com ER0S-3. Resultado dentro da tolerância de aprovação.

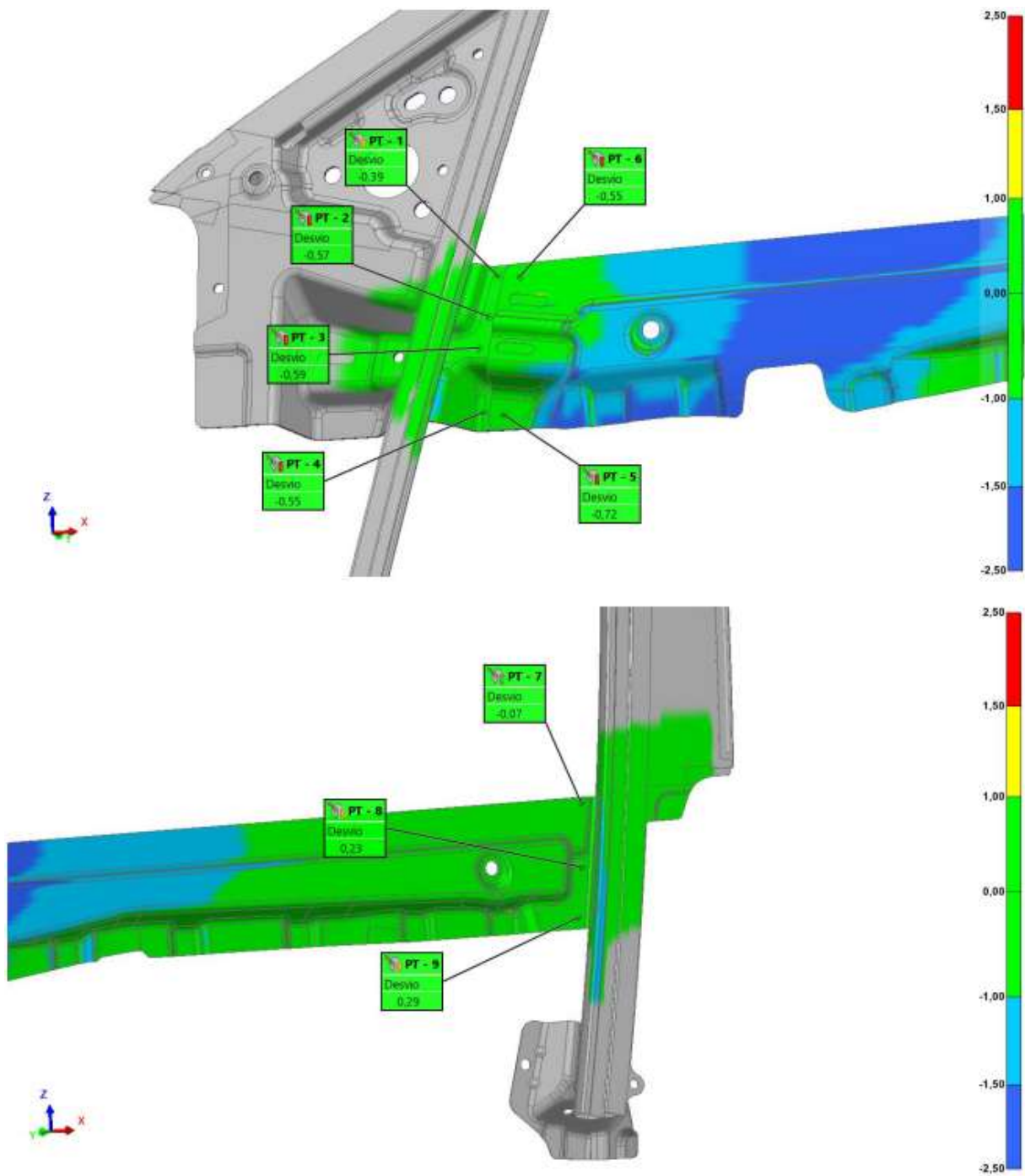


Figura 15: Análise dimensional de um dos corpos de prova soldados com ER0S-6. Resultado dentro da tolerância de aprovação, porém, nota-se uma variação (em azul) maior causada pela energia de soldagem.

Na avaliação dos 12 componentes, notou-se que:

- Com o arame ER70S-3, foi possível reduzir significativamente as distorções dimensionais, com os resultados bem estáveis e parecidos entre si;
- Com o arame ER 70S6, os resultados foram satisfatórios, com exceção de 1 componente, porém havia maior presença de distorção no escaneamento das peças.

Dentro da amostragem observada, o arame ER70S-3 gerou uma estabilidade dimensional dos componentes soldados mais próximo das tolerâncias permitidas por norma, bem como com menor variação entre as peças observadas.

3.2 Macrografias

Os componentes foram submetidos a macrografia, com critérios de aceitação baseado nas normas GMW14058 (General Motors) [4] e Engineering Standard MS181-13 (Hyundai Motors) [5].

Abaixo, os resultados das macrografias realizadas com o arame ER70S-3 e outro com o arame ER 70S6:

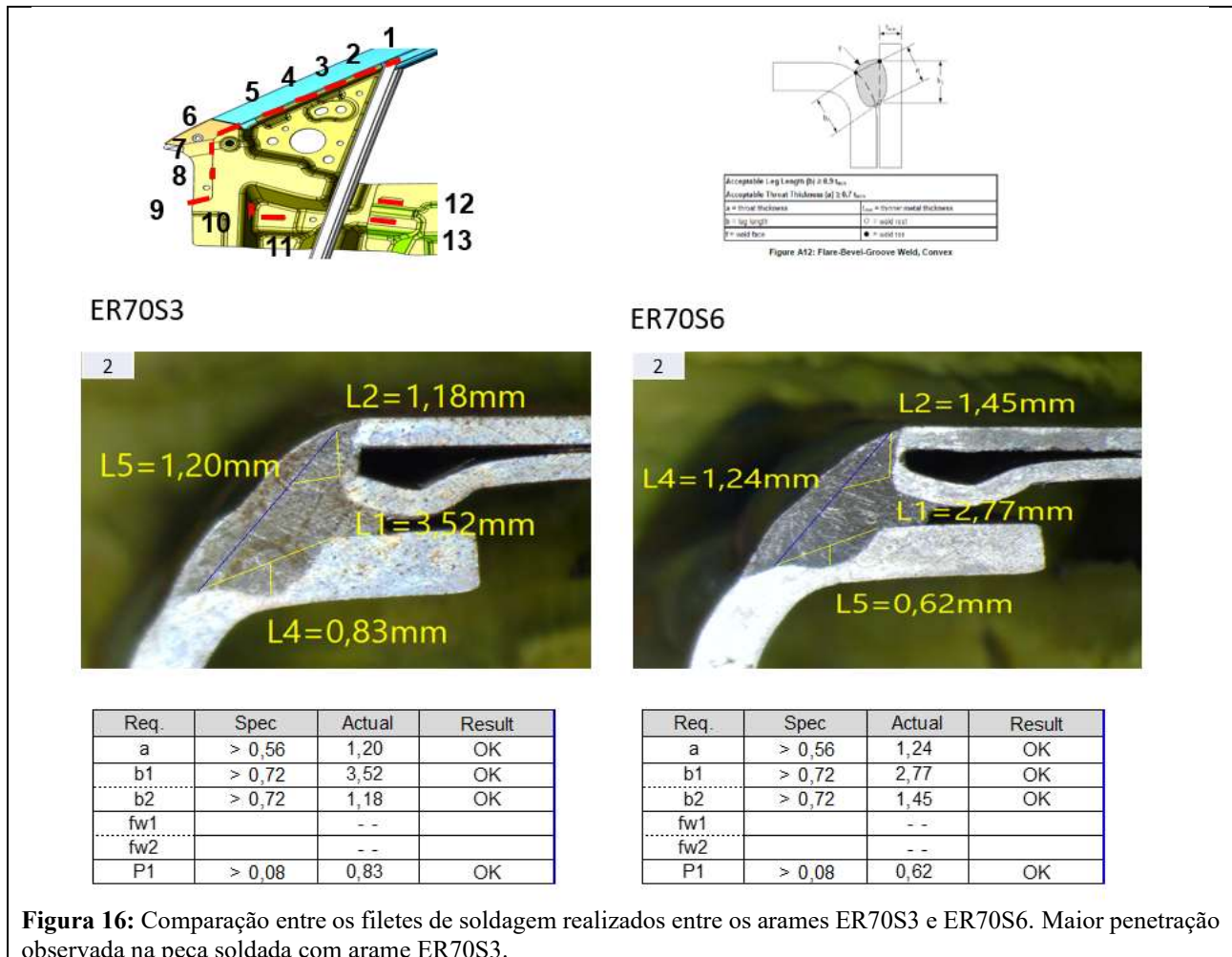
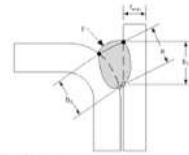
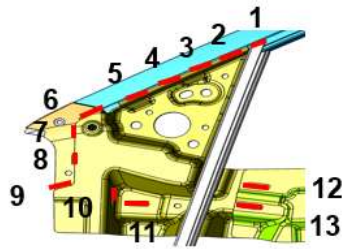


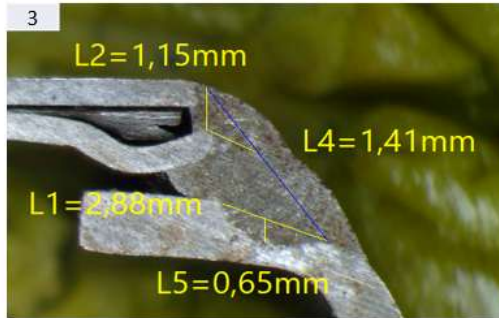
Figura 16: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.



Acceptable Leg Length (b) ≥ 0.9 a _{min}	
Acceptable Throat Thickness (a) ≥ 0.7 b _{min}	
a = throat thickness	a _{min} = thinner metal thickness
b = leg length	b _{min} = weld root
P = weld face	P _{min} = weld toe

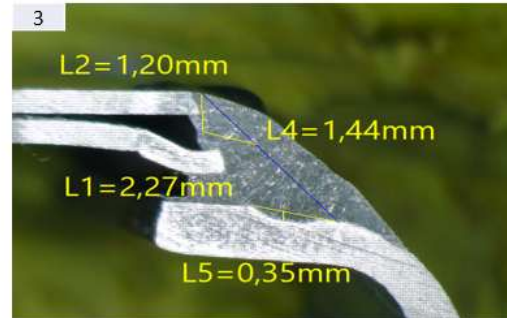
Figure A12: Flare-Bevel-Groove Weld, Convex

ER70S3



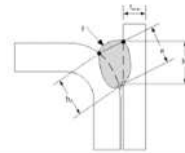
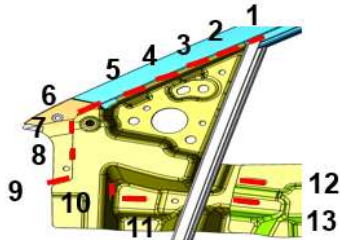
Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,56	1,41	OK
b1	> 0,72	2,88	OK
b2	> 0,72	1,15	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,65	OK

ER70S6



Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,56	1,44	OK
b1	> 0,72	2,27	OK
b2	> 0,72	1,20	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,35	OK

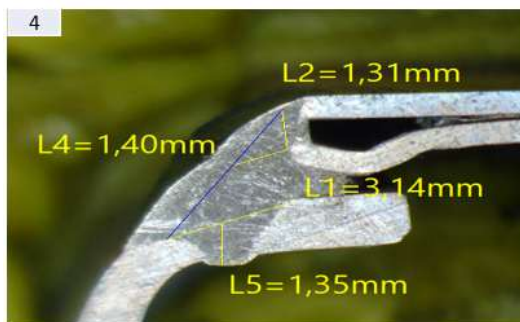
Figura 17: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.



Acceptable Leg Length (b) ≥ 0.9 a _{min}	
Acceptable Throat Thickness (a) ≥ 0.7 b _{min}	
a = throat thickness	a _{min} = thinner metal thickness
b = leg length	b _{min} = weld root
P = weld face	P _{min} = weld toe

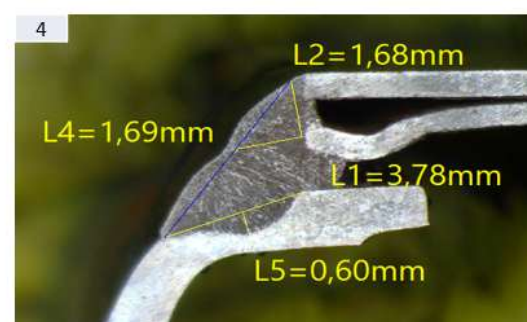
Figure A12: Flare-Bevel-Groove Weld, Convex

ER70S3



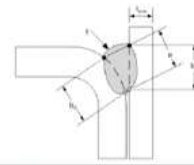
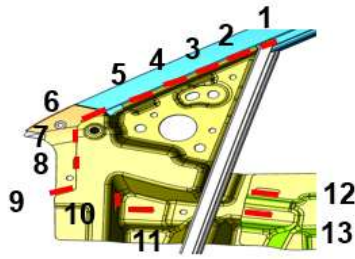
Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,56	1,40	OK
b1	> 0,72	3,14	OK
b2	> 0,72	1,31	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	1,35	OK

ER70S6



Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,56	1,69	OK
b1	> 0,72	3,78	OK
b2	> 0,72	1,68	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,60	OK

Figura 18: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.

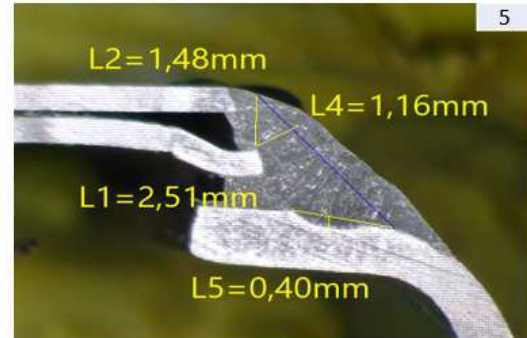
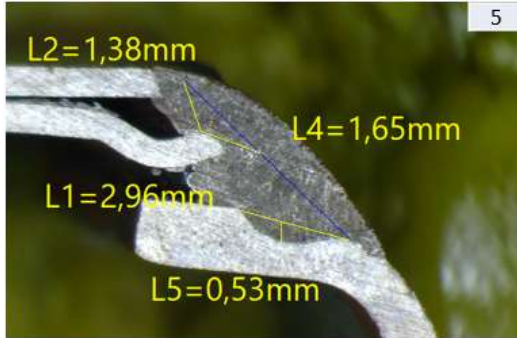


Acceptable Leg Length (b) $\geq 0.7 t_{min}$	t_{min} = thinner metal thickness
Acceptable Throat Thickness (a) $\geq 0.7 t_{min}$	○ = weld root
a = throat thickness	● = weld toe
b = leg length	
fw1 = weld face	
fw2 = weld toe	

Figure A12: Flare-Bevel-Groove Weld, Convex

ER70S3

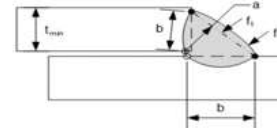
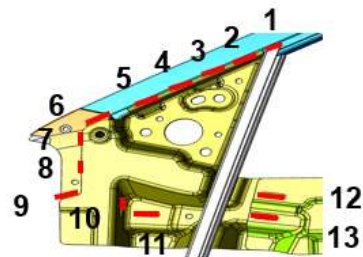
ER70S6



Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,56	1,65	OK
b1	> 0,72	2,96	OK
b2	> 0,72	1,38	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,53	OK

Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,56	1,16	OK
b1	> 0,72	2,51	OK
b2	> 0,72	1,48	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,40	OK

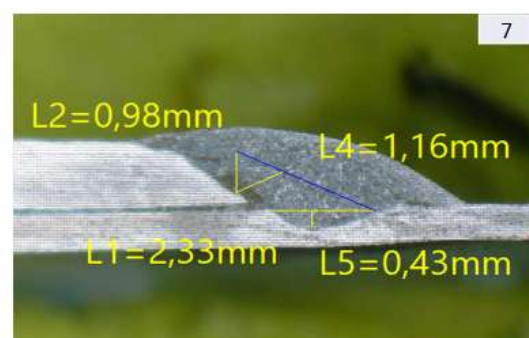
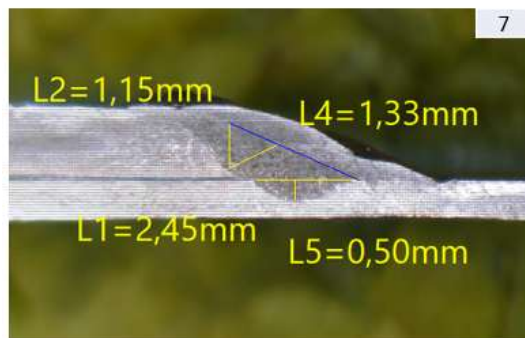
Figura 19: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.



Acceptable Leg Length (b) $\geq 0.7 t_{min}$	t_{min} = thinner metal thickness
Acceptable Throat Thickness (a) $\geq 0.7 t_{min}$	○ = weld root
a = throat thickness	● = weld toe
b = leg length	
fw1 = weld face	
fw2 = weld toe	

ER70S3

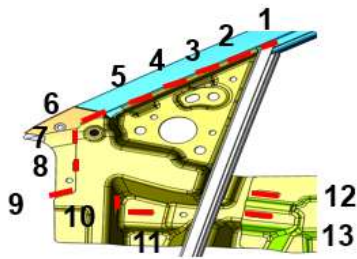
ER70S6



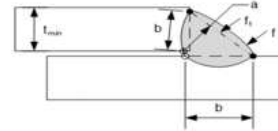
Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,70	1,33	OK
b1	> 0,90	2,45	OK
b2	> 0,90	1,15	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,50	OK

Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,70	1,16	OK
b1	> 0,90	2,33	OK
b2	> 0,90	0,98	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,43	OK

Figura 20: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.

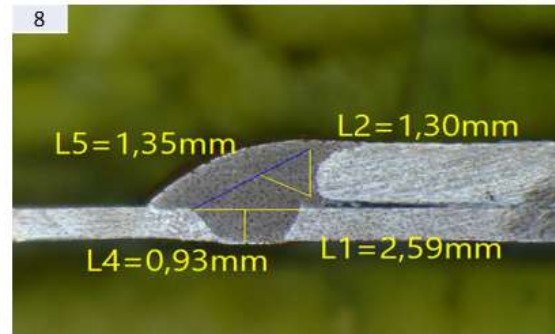
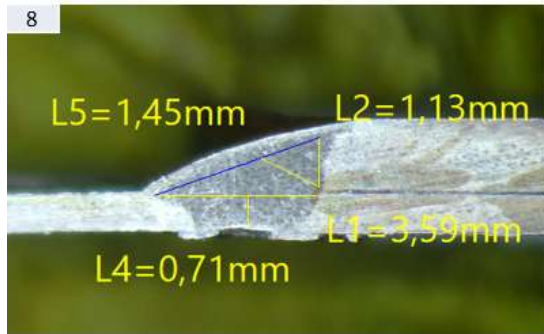


ER70S3



Acceptable Leg Length (b) ≥ 0.9 t _{min}	
Acceptable Throat Thickness (a) ≥ 0.7 t _{min}	
a = throat thickness	t _{min} = thinner metal thickness
b = leg length	○ = weld root
f = weld face	● = weld toe

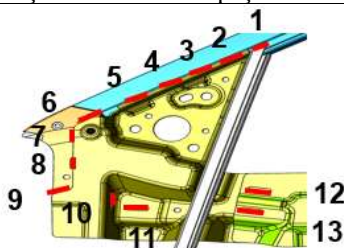
ER70S6



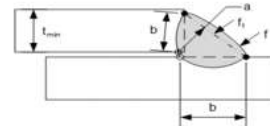
Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,70	1,45	OK
b1	> 0,90	3,59	OK
b2	> 0,90	1,13	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,71	OK

Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,70	1,35	OK
b1	> 0,90	2,59	OK
b2	> 0,90	1,30	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,93	OK

Figura 21: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S6.

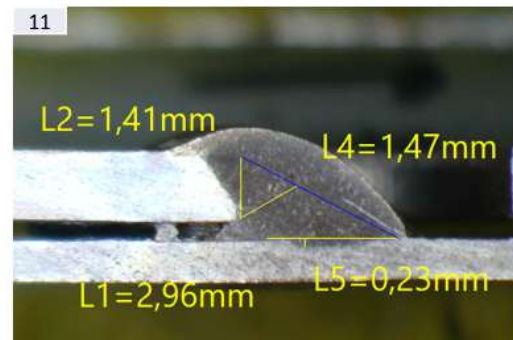
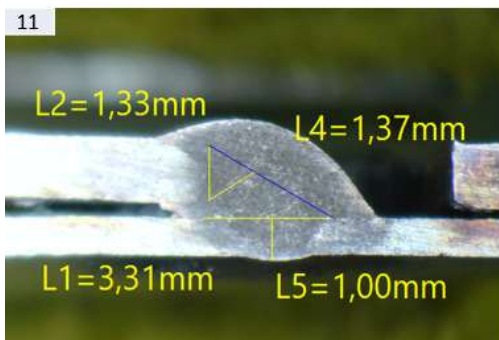


ER70S3



Acceptable Leg Length (b) ≥ 0.9 t _{min}	
Acceptable Throat Thickness (a) ≥ 0.7 t _{min}	
a = throat thickness	t _{min} = thinner metal thickness
b = leg length	○ = weld root
f = weld face	● = weld toe

ER70S6



Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,70	1,37	OK
b1	> 0,90	3,31	OK
b2	> 0,90	1,33	OK
fw1			
fw2			
P1	> 0,08	1,00	OK

Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,70	1,47	OK
b1	> 0,90	2,96	OK
b2	> 0,90	1,41	OK
fw1		--	
fw2		--	
P1	> 0,08	0,23	OK

Figura 22: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.

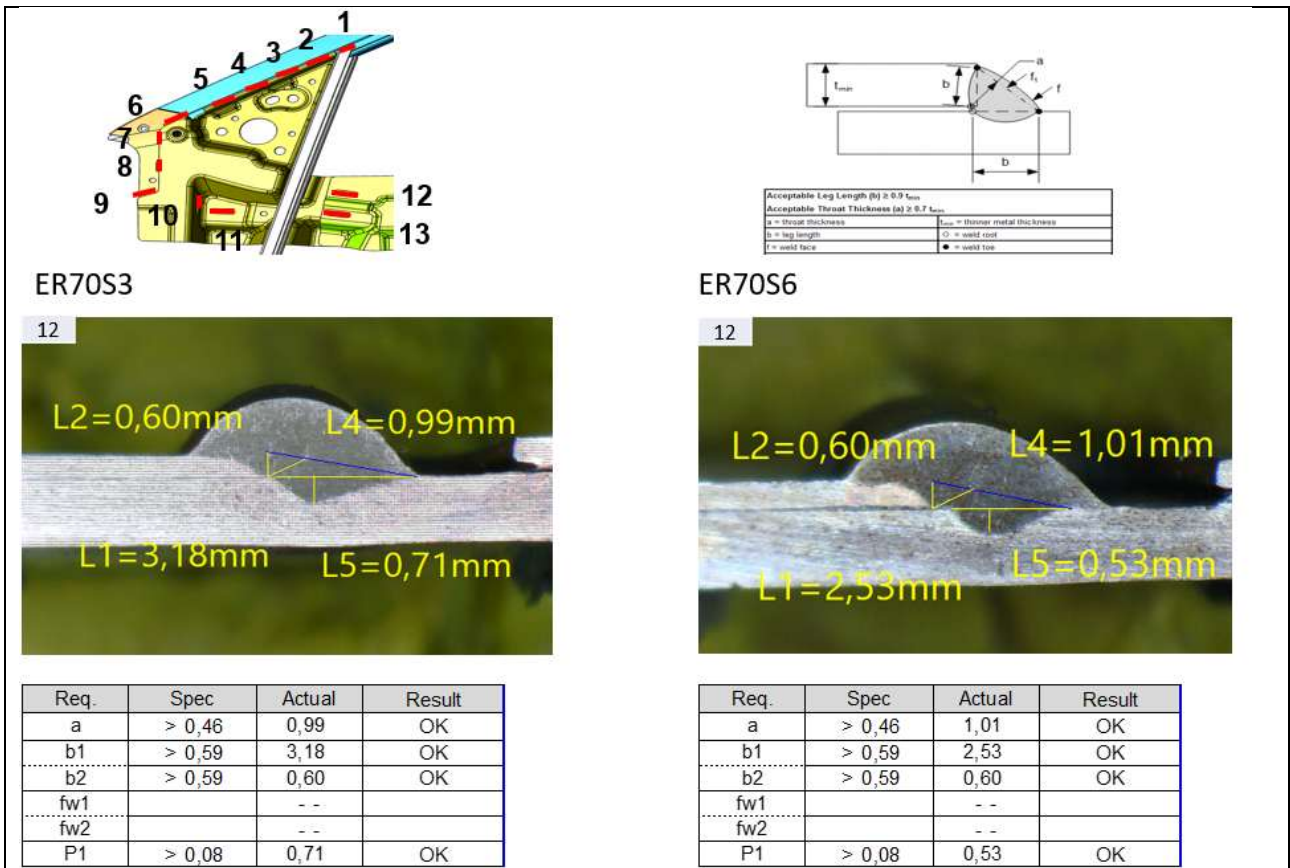


Figura 23: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.

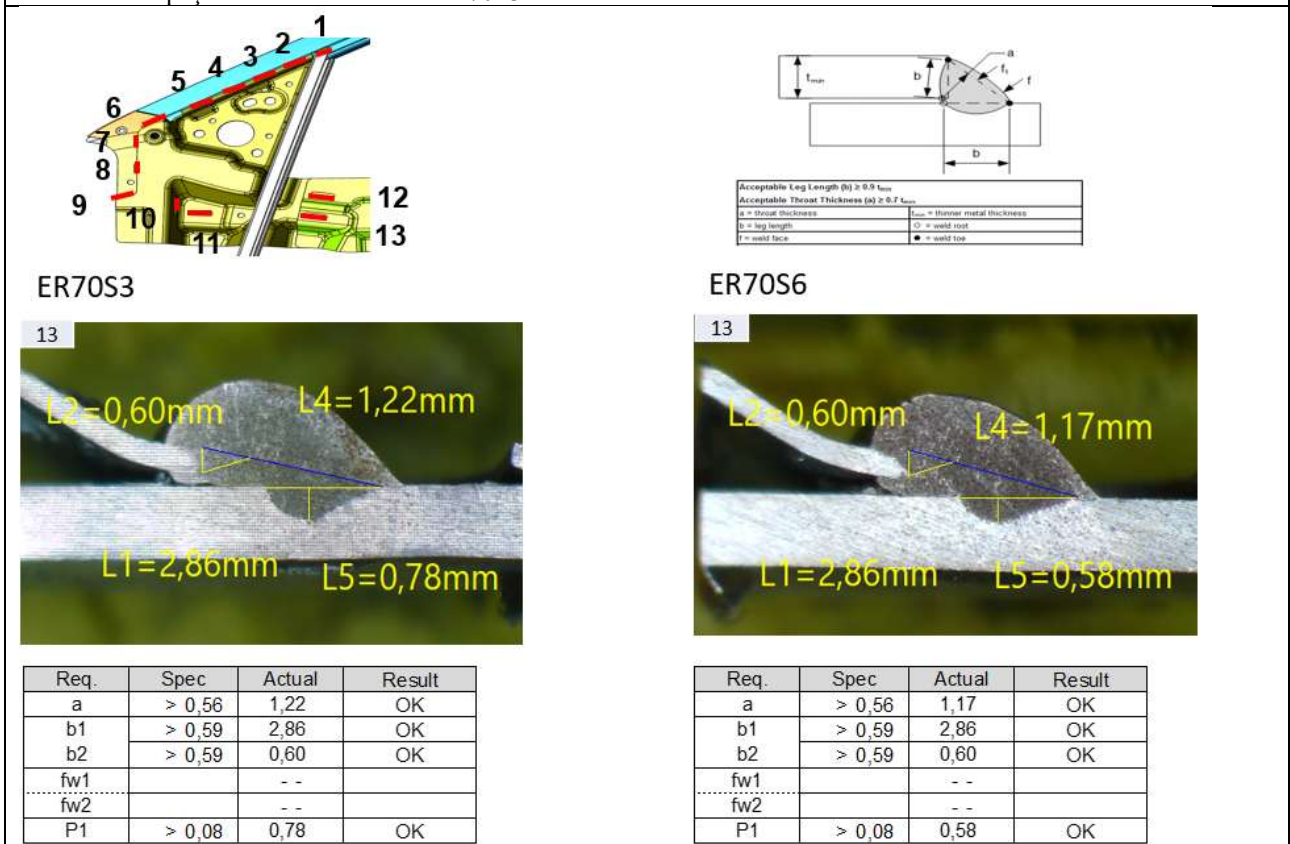
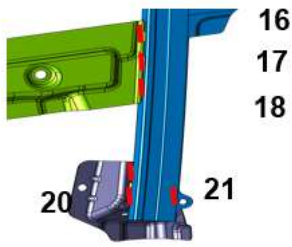
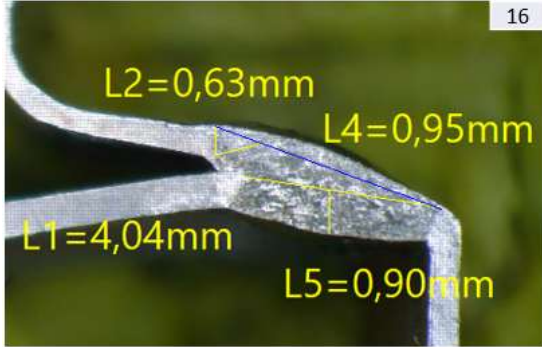


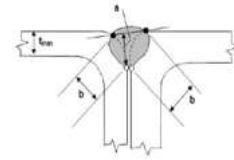
Figura 24: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.



ER70S3



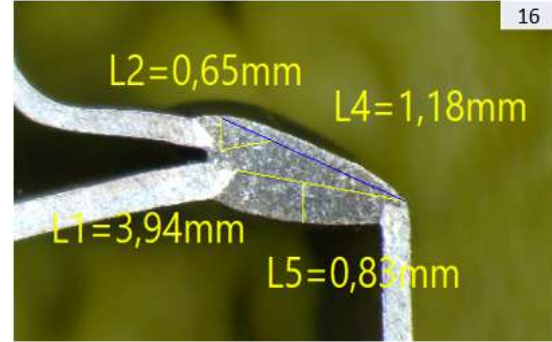
Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,46	0,95	OK
b1	> 0,59	4,04	OK
b2	> 0,59	0,63	OK
fw1	--	--	
fw2	--	--	
P1	> 0,08	0,90	OK



Acceptable Leg Length (b) ≥ 0,9 t _{min}	
Acceptable Throat Thickness (a) ≥ 0,7 t _{min}	
a = throat thickness	t _{min} = thinner metal thickness
b = leg length	○ = weld root
○ = weld face	● = weld toe

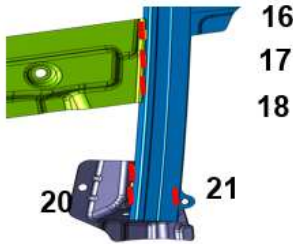
Figure A1b: Flare-V-Groove Weld, Convex

ER70S6

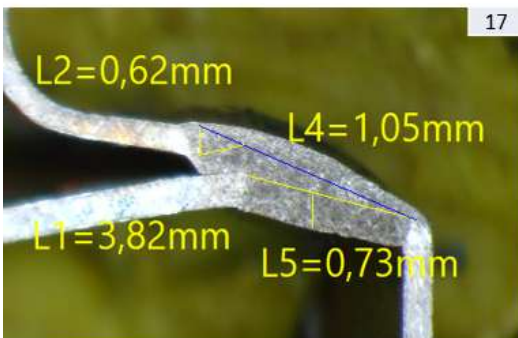


Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,46	1,18	OK
b1	> 0,59	3,94	OK
b2	> 0,59	0,65	OK
fw1	--	--	
fw2	--	--	
P1	> 0,08	0,83	OK

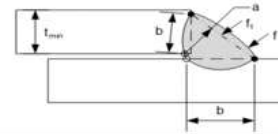
Figura 25: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S3.



ER70S3

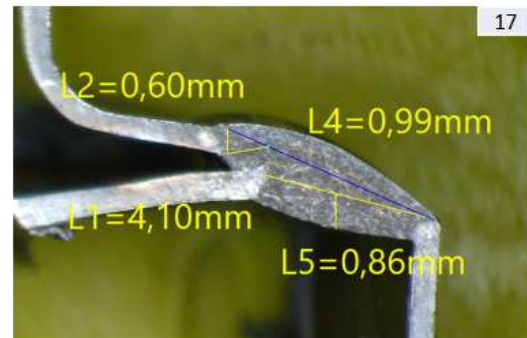


Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,46	1,05	OK
b1	> 0,59	3,82	OK
b2	> 0,59	0,62	OK
fw1	--	--	
fw2	--	--	
nt	> 0,08	0,73	OK



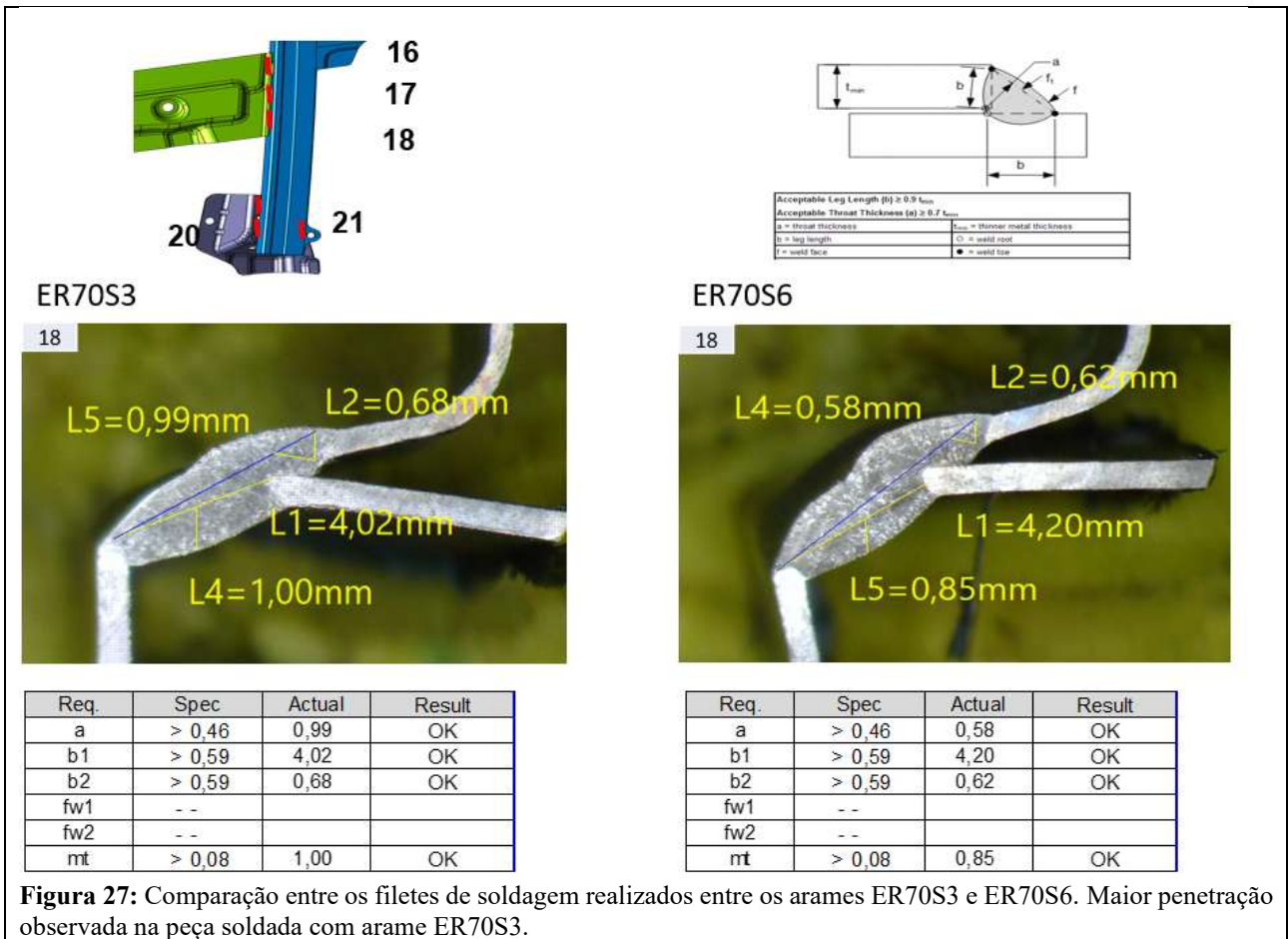
Acceptable Leg Length (b) ≥ 0,9 t _{min}	
Acceptable Throat Thickness (a) ≥ 0,7 t _{min}	
a = throat thickness	t _{min} = thinner metal thickness
b = leg length	○ = weld root
○ = weld face	● = weld toe

ER70S6

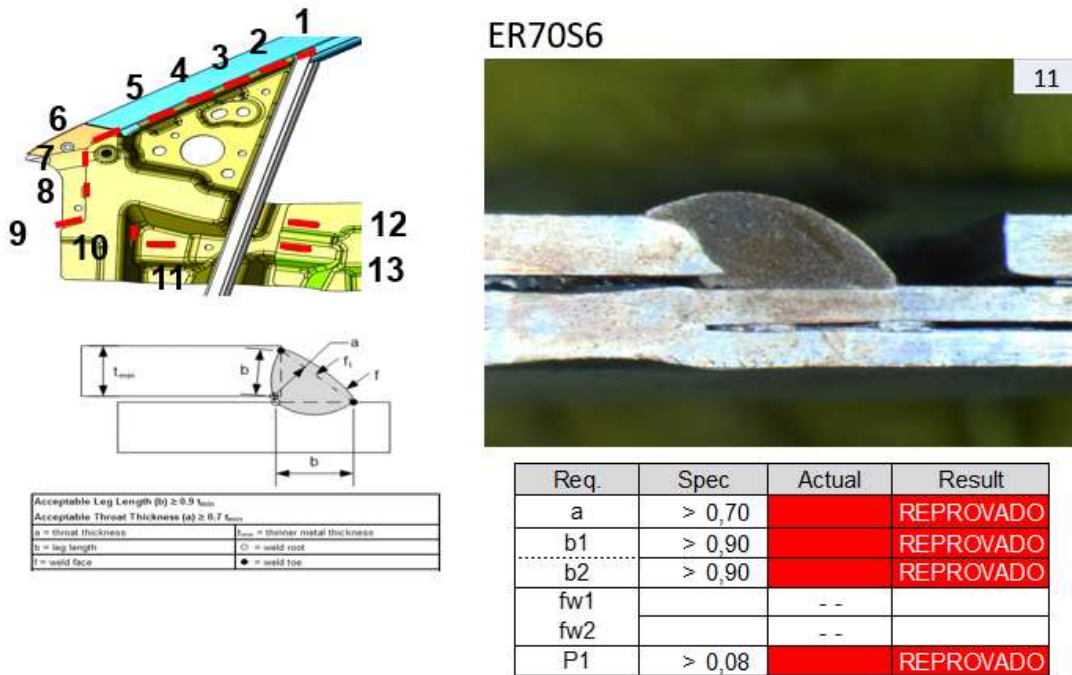


Req.	Spec	Actual	Result
a	> 0,46	0,99	OK
b1	> 0,59	4,10	OK
b2	> 0,59	0,60	OK
fw1	--	--	
fw2	--	--	
nt	> 0,08	0,86	OK

Figura 26: Comparação entre os filetes de soldagem realizados entre os arames ER70S3 e ER70S6. Maior penetração observada na peça soldada com arame ER70S6.



Como resultado de critério de aceitação, todos os corpos de prova soldados com o arame ER70S3 obtiveram êxito, conforme apresentado e detalhado nas figuras deste tópico. Dos 6 corpos de prova soldados com o arame ER70S6, dois corpos de prova apresentaram um filete de solda reprovado, o de número 11 (conforme figura abaixo). Os outros componentes atingiram os requisitos mínimo de geometria de soldagem e penetração para serem aprovados.



Abaixo, a comparação entre as médias de todos os componentes soldados neste estudo (os valores de Garganta, perna 1, Perna 2 e penetração estão em milímetros):

Welding Report	Arame	Solda	Garganta	Perna 1	Perna 2	Penetração
Amostra	Arame	N da Solda	A	b1	b2	P1
MÉDIA	ER70S3	2	1,45	3,35	1,49	0,89
MÉDIA	ER70S3	3	1,27	2,92	1,20	0,85
MÉDIA	ER70S3	4	1,55	3,33	1,53	1,05
MÉDIA	ER70S3	5	1,49	2,67	1,46	0,47
MÉDIA	ER70S3	7	1,47	2,84	1,21	0,57
MÉDIA	ER70S3	8	1,41	3,06	1,27	0,71
MÉDIA	ER70S3	11	1,32	2,77	1,31	0,42
MÉDIA	ER70S3	12	0,99	2,78	0,61	0,58
MÉDIA	ER70S3	13	1,15	2,57	0,61	0,72
MÉDIA	ER70S3	16	0,99	4,26	0,62	0,91
MÉDIA	ER70S3	17	1,07	4,01	0,62	0,79
MÉDIA	ER70S3	18	0,96	3,88	0,63	0,98

Tabela 3: Valores médios obtidos na soldagem com arame ER70S3.

Welding Report	Arame	Solda	Garganta	Perna 1	Perna 2	Penetração
Amostra	Arame	N da Solda	A	b1	b2	P1
MÉDIA	ER70S6	2	1,37	3,03	1,32	0,84
MÉDIA	ER70S6	3	1,27	2,73	1,20	0,89
MÉDIA	ER70S6	4	1,58	3,43	1,56	0,93
MÉDIA	ER70S6	5	1,43	2,56	1,29	0,40
MÉDIA	ER70S6	7	1,36	2,40	1,21	0,43
MÉDIA	ER70S6	8	1,37	2,74	1,30	0,82
MÉDIA	ER70S6	11*	1,39	2,29	1,33	0,23
MÉDIA	ER70S6	12	1,04	2,54	0,61	0,50
MÉDIA	ER70S6	13	1,03	2,53	0,62	0,65
MÉDIA	ER70S6	16	1,05	4,20	0,62	0,89
MÉDIA	ER70S6	17	0,99	4,04	0,65	0,79
MÉDIA	ER70S6	18	0,76	4,17	0,65	0,75

Tabela 4: Valores médios obtidos na soldagem com arame ER70S6.

* 2 corpos de prova não obtiveram penetração suficiente para serem considerados no cálculo da média deste estudo.

Comparando somente os valores de penetração, dentro da amostragem de componentes soldados, nota-se uma maior tendência de penetração com o arame ER70S3 (9 filetes em 12).

Solda	Penetração	Penetração	Diferença %	Maior Penetração
N da Solda	ER70S3	ER70S6	Penetração	
2	0,89	0,84	6%	ER70S3
3	0,85	0,89	5%	ER70S6
4	1,05	0,93	11%	ER70S3
5	0,47	0,40	15%	ER70S3
7	0,57	0,43	25%	ER70S3
8	0,71	0,82	13%	ER70S6
11	0,42	0,23	45%	ER70S3
12	0,58	0,50	14%	ER70S3
13	0,72	0,65	10%	ER70S3
16	0,91	0,89	2%	ER70S3
17	0,79	0,79	0%	Iguais
18	0,98	0,75	23%	ER70S3

Tabela 5: Comparação entre a Penetração obtida entre os arames ER70S3 e ER70S6.

Os resultados obtidos na macrografia, nas amostras analisadas, mostram uma maior tendência de penetração ao utilizarmos o arame ER70S3.

3.3 Análise e Aspecto Visual da Solda

Os componentes foram submetidos ao ensaio visual, com critérios de aceitação baseado nas normas GMW14058 (General Motors) [4] e Engineering Standard MS181-13 (Hyundai Motors) [5].

Os objetivos do ensaio visual estão relacionados a identificação de defeitos como porosidade, queima excessiva da camada galvanizada, índice de respingos e excesso de ilhas de sílica. Abaixo, imagens dos componentes soldados com os arames ER70S3 e ER70S6:



Figura 29: Filetes de número 16, 17 e 18. Presença de Porosidade no cordão 17 feito com o arame ER70S6.

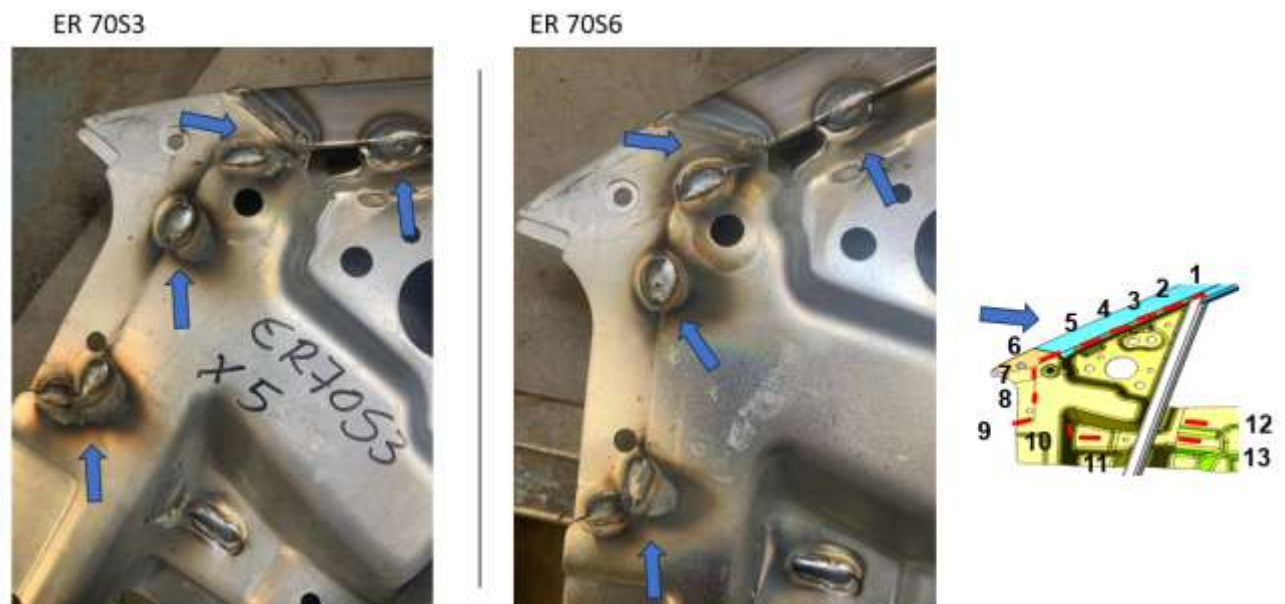


Figura 30: Filetes de número 2, 3, 4, 5, 7 e 8. Presença de Porosidade no cordão 7 feito com o arame ER 70S6.



Figura 31: Filetes de número 12 e 13. Nota-se uma maior queima da área galvanizada no componente soldado com ER70S6.



Figura 32: Filetes de número 10 e 11. Nota-se uma maior queima da área galvanizada no componente soldado com ER70S6.

Os resultados encontrados após realização de ensaio visual nos 12 componentes soldados nos apresentaram problemas como porosidade (como apresentado nas figuras 28 e 29), excesso de respingos em alguns pontos e, além da queima maior da chapa galvanizada na Zona Afetada pelo Calor nos componentes soldados com o arame ER70S6. Tudo isso influencia na resistência a corrosão do componente, e será mais detalhado e discutido no ensaio de Salt Spray a seguir (item 3.4).

A conclusão após ensaio visual foi de que assoldas realizadas com o arame ER70S3 obtiveram um aspecto visual com menor ou nenhuma incidência de respingos, poros ou outros defeitos que podem levar ao retrabalho deste componente quando o mesmo está sendo produzido em linha.

3.4 Ensaio de corrosão e envelhecimento acelerado por exposição à névoa salina (Salt Spray).

O ensaio de SALT SPRAY em chapas galvanizadas soldadas é fundamental porque a soldagem degrada a camada de zinco na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e em chapas finas, como nesse experimento, degrada o lado oposto do cordão, reduzindo a proteção catódica e tornando essa região mais vulnerável à corrosão.

Além do que foi explicado acima, o cordão de solda, sem o revestimento da galvanização, apresenta microestrutura propícia ao ataque localizado, enquanto porosidades e descontinuidades podem intensificar a penetração do eletrólito e

acelerar o processo corrosivo. Assim, o ensaio realizado neste experimento tem como objetivos avaliar a integridade da proteção anticorrosiva após a soldagem, identificar áreas críticas de corrosão, comparando os dois consumíveis utilizados neste teste. Foi selecionado uma amostra de cada um dos componentes soldados, sendo um com o arame ER70S3 e o outro com o arame ER70S6. O ensaio de Salt Spray foi realizado conforme normativa ASTM B117:2019[6].

Neste ensaio, o objetivo foi analisar a queima da superfície galvanizada no lado oposto do cordão de solda, para se analisar a relação entre penetração e queima da superfície galvanizada, pois esta é a região que fica exposta ao tempo no produto final.



Figura 33: Equipamento de Ensaio e posicionamento de amostra.



Figura 34: Corpos de prova que forma submetidos ao ensaio de Salt Spray.

Os corpos de prova foram levados a câmara para realização de ensaio, e foram sendo observados em intervalos de 24 horas. Até o ensaio de 48 horas, ambos os componentes estavam com o mesmo comportamento. Quando analisamos após 72 horas, pudemos observar que o corpo de prova soldado com ER70S-6 começou a oxidar na região próximo aos filetes de solda (figura 34).



Figura 35: Resultados obtidos após 72 horas de Salt Spray, onde houve corrosão de zinco (branca) e corrosão do metal base (vermelha) Aqui, o corpo de prova soldado com ER70S-6 começou a apresentar pontos de oxidação vermelhos (metal base) na área de ZTA dos cordões de solda.

Colocamos novamente os dois corpos de prova na câmara para sequência do ensaio. Com 96 horas de Salt Spray, houve corrosão de zinco (branca) e corrosão do metal base (vermelha) do corpo de prova soldado com ER 70S-3 (figura 35);



Figura 36: Resultados obtidos após 96 horas de Salt Spray. Aqui, o corpo de prova soldado com ER70S-3 começou a apresentar pontos de oxidação vermelhos (metal base) na área de ZTA dos cordões de solda.

Foi constatado que o corpo de prova soldado com ER70S-3 teve uma maior resistência a corrosão no ensaio de SALT SPRAY, pois o mesmo suportou 96 horas à exposição, frente as 72 horas do corpo de prova soldado com ER70S-6.

Podemos citar que, apesar dos níveis maiores de penetração obtidos com o arame ER70S-3, esta característica não influenciou na perda de camada galvanizada na face oposta do cordão soldado.

4. CONCLUSÃO

Os testes práticos para confecção dos corpos de prova evidenciaram uma melhor soldabilidade do arame ER70S-3, frente ao arame ER70S-6 sendo que ambos foram utilizados nas mesmas condições, com as mesmas variáveis, soldando o mesmo lote de peças, no mesmo dispositivo, fonte de soldagem e robô. Nestas condições, focamos também em evidenciar os efeitos práticos da convecção de Marangoni, sendo esta uma força atuante que se alteraria devido aos teores diferentes de elementos desoxidantes nos arames utilizados neste experimento, e evidenciar os resultados que encontraríamos após os ensaios propostos de aspecto visual, deformação, penetração e Salt Spray.

Em todos os ensaios o arame ER70S-3 se destacou, como apresentado anteriormente. Algo que ficou evidenciado foi a relação penetração x deformação x queima da camada de zinco. Na média, o arame ER70S-3 obteve uma maior penetração com a mesma energia de soldagem aplicada, e esta penetração superior não acarretou em maior deformação ou queima da camada de zinco na face oposta, como apresentado nos resultados dos testes. Outro ponto de grande destaque foi que o arame ER70S-3 não apresentou defeitos comuns causados pela queima do zinco na camada galvanizada, como porosidade ou excesso de respingos.

Para o componente soldado em questão, estes fatores são primordiais para a garantia da qualidade do produto fabricado, pois o mesmo possui requisitos dimensionais muito restritos, bem como necessita de um processo de soldagem com maior estabilidade.

Como conclusão, com base no que foi anteriormente exposto, o arame ER70S-3 apresentou os melhores resultados de penetração, deformação, proteção da camada galvanizada e qualidade visual do cordão de solda.

5. AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, SEMPRE, agradeço a DEUS pela vida que ELE proporciona para a minha família.

Agradeço também a minha família, através da minha esposa Paula e meu filho Enzo, estes que me apoiaram, incentivaram e são a minha força motriz para que possa seguir em frente, com muita perseverança, em todos os momentos.

A empresa Hyundai Welding, através das figuras dos meus grandes amigos André Vicente e Yeonson Ryu, sendo estes grandes incentivadores e motivadores deste e de tantas outras atividades do meu dia a dia.

A empresa DongWon, através das figuras do grande amigo Robert Almeida (este fundamental para a realização deste trabalho, com muitas conversas, planos e realizações) e também dos senhores Gabriel Cordova, Felipe Fernandes, João Telles, Lucas Castilho, Thiago Bortolazzo, Rodrigo Dias e pelo sr Kicheol Kim.

Agradeço também aos senhores Bianco da empresa BGLAB e Mauricio Grisotto, da empresa Comteq Soldas, pelo apoio na realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os professores da UFMG e, principalmente, meu orientador e amigo Ariel Árias, por conversas valiosas e pelo convite e incentivo em participar do curso de pós graduação da UFMG. Este convite me proporcionou conhecer pessoas incríveis e ter uma experiência educacional/profissional que levarei para toda minha vida.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ASME. ASME Seção II Parte C:2023. Specification for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals, 2013.
- [2] Lancaster, J. F., (1993). Metallurgy of Welding. 5th Edition, London. Chapman and Hall, p389.
- [3] Vicente, A. André. The correct choice among welding wires ER70S 2, ER70S-3 and ER70S-6, according to the oxidation level of base metal - <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.78.15>
- [4] Norma GMW 14058: Critérios de aceitação de solda e métodos de reparo: Juntas soldadas a arco
- [5] Engineering Standard Hyundai Motors MS181-13
- [6] ASTM – American National Standard : B117:2019
- [7] Wang, Y.; Tsai, H. L. (2001). Effects of Surface Active Elements on Weld Pool Fluid Flow and Weld Penetration in Gas Metal Arc Welding. International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 2067–2080.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.