

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

FRANCO HECHER PAGNO

**ESTUDO COMPARATIVO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW, FCAW E
HLAW NA UNIÃO DE PEÇAS FERROVIÁRIAS**

CAXIAS DO SUL

2023

FRANCO HECHER PAGNO

**ESTUDO COMPARATIVO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW, FCAW E
HLAW NA UNIÃO DE PEÇAS FERROVIÁRIAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Automotiva.

Área de Concentração: Processos de soldagem

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez
Acosta

CAXIAS DO SUL

2023

FRANCO HECHER PAGNO

**ESTUDO COMPARATIVO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW, FCAW E
HLAW NA UNIÃO DE PEÇAS FERROVIÁRIAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Automotiva.

Área de Concentração: Processos de soldagem

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez
Acosta

Aprovado em 17/11/2023

Banca Examinadora

Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

O Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) representa um momento único: o final de uma longa etapa na trajetória acadêmica de um estudante, da pré-escola à universidade. Este trabalho encerra meu ciclo de graduação para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Automotiva. Diversas pessoas, empresas e entidades foram importantes em minha trajetória e todas elas merecem um agradecimento especial.

Muito obrigado ao Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta, que me orientou, me guiou e contribuiu de modo significativo para a construção deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Alexandre Vieceli, sou grato pelo apoio e pelas sugestões apresentadas para tornar o trabalho de conclusão mais qualificado.

Às empresas Randoncorp, através de sua coligada Randon S. A Implementos e Participações, registro meu agradecimento pelo apoio incondicional ao estudo apresentado neste trabalho e por ter me permitido desenvolvê-lo, colocando todos os recursos necessários à disposição.

Aos funcionários da Randon S.A. Implementos e Participações que, de alguma forma, contribuíram para que os objetivos deste TCC fossem atingidos, meu muito obrigado.

Ao colega de trabalho Eng. Me. Tarly Iselino Amorim Wengrat, que, com seu amplo conhecimento técnico, contribuiu significativamente na orientação e no apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento à Laser de Joinville, pelo apoio, disponibilidade de tempo, de pessoas, de conhecimento e por colocar seu equipamento à disposição para a realização dos testes.

A meus pais, Sonia e Gilberto, que foram os responsáveis por me incentivar, me apoiar e me auxiliar durante toda a minha trajetória acadêmica.

E, acima de tudo, a Deus, por sempre me conduzir e, nos momentos de fraqueza, me prover de forças para chegar até aqui.

RESUMO

A produtividade de uma indústria representa o seu diferencial competitivo em relação ao mercado e ao seu próprio faturamento. Novos materiais e tecnologias aplicadas aos processos de fabricação estão sempre no foco dos estudos do segmento industrial. Nos últimos anos, a indústria automotiva e naval manteve o foco na pesquisa de processos de soldagem com utilização de laser, com o objetivo de aumentar a velocidade de soldagem. Assim, este projeto de conclusão de curso de Engenharia Automotiva teve como objetivo realizar testes comparativos entre os processos de soldagem GMAW, FCAW e HLAW, bem como as geometrias de bisel de 30° e 45° de uma junta soldada de uma viga de vagão ferroviário. Esta junta apresenta uma chapa de aço patinável com alta espessura e, atualmente, demanda um processo de soldagem multipasses, que é improdutivo e com alto aporte térmico. Os testes realizados focaram no controle do aporte térmico da junta, mas, principalmente, no ganho de produtividade, através da redução do tempo e do número de passes de soldagem e do aumento da velocidade do processo, apresentando seus custos operacionais e de implementação. A metodologia do trabalho contemplou as etapas de definição dos corpos de provas, determinação dos parâmetros de soldagem dos processos e execução dos procedimentos de soldagem. Após, as amostras foram preparadas para os ensaios de tração, de dobramento lateral, de microdureza, de micrografia e de macrografia. Os resultados obtidos mostraram que os processos GMAW e FCAW foram aprovados nos ensaios de tração. Também mostrou que o processo HLAW foi o mais produtivo, com maior redução de custo operacional, porém, o mais caro para ser implementado. Comparando as geometrias das juntas, o bisel atual de 45° se mostrou excessivo e desnecessário e o bisel de 30° respondeu bem ao processo.

Palavras-Chave: aços patináveis; soldagem multipasses; soldagem em chapas grossas; vagões ferroviários; Soldagem Híbrida Laser-Mag (HLAW); Soldagem FCAW; Soldagem GMAW; aporte térmico; produtividade; temperatura de pré-aquecimento e interpasse; redução de custo.

ABSTRACT

The productivity of an industry represents its competitive advantage in relation to the market and its own revenue. New materials and technologies applied in manufacturing processes are always on focus of studies on industrial segment. In recent years, the automotive and naval industries have maintained their focus on researching welding processes using lasers, looking for increase welding speeds. Therefore, this Automotive Engineering course completion project aimed to execute comparative tests between the GMAW, FCAW and HLAW welding processes, as well as the 30° and 45° bevel geometries of a welded joint of a railway carriage beam. This joint features a high thickness weathering steel plate, and currently requires a multipass welding process, which is unproductive and has a high heat input. These tests focused on controlling the heat input of the joint, but mainly on gaining productivity, by reducing time, the number of welding passes and increasing the welding speed, presenting its operational and implementation costs. The work methodology stages included the definition of test specimens, determination of welding process parameters and execution of welding procedures stages. Afterwards, samples were prepared for tensile, lateral bending, microhardness, micrography and macrography tests. The results obtained, showed that GMAW and FCAW processes were approved in tensile tests. It also showed that HLAW process was the most productive, with greatest reduction in operational costs, however, the most expensive to implement. Comparing the joint geometries, current 45° bevel proved to be excessive and unnecessary and 30° bevel responded well to the process.

Keywords: weathering steels; multipass welding; welding on thick plates; railway carriages; Hybrid Laser Arc Welding (HLAW); FCAW welding; GMAW welding; heat input; productivity; preheating and interpass temperature; cost reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Peça original no processo atual.....	17
Figura 2 - Vagão ferroviário <i>Sider</i> FLF fabricado pela Randon em 2022	18
Figura 3 - Box de soldagem de vigas do vagão <i>Sider</i> FLF	19
Figura 4 – Cronologia dos processos de soldagem.....	21
Figura 5 – Nomenclaturas da junta soldada	22
Figura 6 – Soldagem multipasses	23
Figura 7 – Processo de arco elétrico GMAW.....	24
Figura 8 – Impurezas do processo formando a escória no processo FCAW.....	25
Figura 9 – Diferença no perfil do metal de solda nas soldagens GMAW e FCAW.....	26
Figura 10 – Processo híbrido LASER-MAG.....	27
Figura 11 – Macrografias do processo laser na esquerda, MAG no centro e híbrido LASER-MAG na direita.....	27
Figura 12 – Velocidades obtidas nos testes de FCAW x FCAW-TIG	29
Figura 13 – Perfil geométrico das juntas dos processos: a) HLAW e b) GMAW	31
Figura 14 – Comparação do tempo e material requeridos consumidos para soldagem de 1 metro de junta com HLAW e GMAW.....	32
Figura 15 – Diagrama da microestrutura de um aço em função da velocidade de resfriamento após a austenitização.	34
Figura 16 – Fluxograma do trabalho de conclusão.....	39
Figura 17 – Fontes utilizadas nos procedimentos: à esquerda está a fonte Laser, centralizada está a fonte IMC e à direita está a fonte SUMIG.....	42
Figura 18 – Célula de soldagem híbrida do SENAI-SC.....	42
Figura 19 – Projeto de junta atual.....	43
Figura 20 – (A) Corpo de prova AM03 bisel V de 45°, igual ao processo atual. (B) Corpo de prova AM01 e AM02 bisel V de 30°, visando comparar alteração de geometria. (C) Corpo de prova AM04 bisel duplo V de 45° com nariz de 16 mm, utilizada para o processo híbrido....	43
Figura 21 – Projeto da junta para chanfro de 45° à esquerda e 30° à direita, ambas com cobertura e espaçamento de 2 mm.....	44
Figura 22 - Projeto da junta com bisel duplo V de 45°.	44
Figura 23 – Preparação das amostras 1, 2 e 3 na bancada para a soldagem.....	47
Figura 24 – Preparação da amostra 4 para a soldagem híbrida	48
Figura 25 – Gráfico de parâmetros médios para o processo híbrido	49

Figura 26 – Critério para retirada dos corpos de prova.	50
Figura 27 – Região da amostra de onde os corpos de prova foram retirados (à esquerda). À direita, aparece o procedimento de corte com serra fita refrigerada.	51
Figura 28 – Amostras de metalografia	52
Figura 29 – Conjunto de CPS finalizados para ensaios de cada uma das quatro amostras.	52
Figura 30 – Projeto do CP de tração.....	53
Figura 31 – Máquina de ensaios de tração e dobramento universal realizando ensaio da amostra 1 do processo GMAW.....	54
Figura 32 - Projeto do CP de dobramento lateral	55
Figura 33 - Microscópio óptico utilizado nos ensaios.....	56
Figura 34 – Pontos de análise da microestrutura para as amostras 1, 2 e 3.....	57
Figura 35 - Pontos de análise da microestrutura para a amostra 4.	57
Figura 36 - Microscópio óptico utilizado nos ensaios.....	58
Figura 37 – Pontos para medição de microdureza.....	59
Figura 38 - Comparativo de empenamento das amostras.....	59
Figura 39 - Curva obtida no ensaio de tração de cada uma das amostras.	60
Figura 40 – Amostras rompidas após ensaio de tração.	62
Figura 41 – Falhas evidenciadas pelos ensaios de tração.....	62
Figura 42 – Dispersão de dados para a tensão de escoamento, resistência a tração e alongamento.	63
Figura 43 – Amostras de dobramento lateral.	65
Figura 44 – Trinca evidenciada no CP 3 da amostra 4.....	65
Figura 45 – Gráfico comparativo entre penetração e ZTA entre as quatro amostras.....	66
Figura 46 – Macrografia das 4 amostras.	67
Figura 47 – Micrografia do metal de base (1) para as 5 amostras.....	68
Figura 48 – Micrografia da ZTA na raiz da junta (2a) para as quatro amostras.	69
Figura 49 – Micrografia da ZTA no reforço da junta (2b) para as quatro amostras.	70
Figura 50 – Micrografia da interface entre ZF e ZTA na raiz da junta (3a) para as quatro amostras. À esquerda de cada uma das imagens, está a ZTA. À direita, está a ZF.....	71
Figura 51 – Micrografia da interface entre ZF e ZTA no reforço da junta (3b) para as quatro amostras. À esquerda de cada uma das imagens, está a ZTA. À direita, está a ZF.....	72
Figura 52 – Micrografia da ZF na raiz da junta (4a) para as quatro amostras.....	73
Figura 53 – Micrografia da ZF no reforço da junta (4b) para as quatro amostras.....	74
Figura 54 – Microestrutura semelhante a martensita próxima a zona 2a correspondente a ZTA	

da amostra 4.....	75
Figura 55 – Descontinuidades encontradas nas micrografias das amostras 2, 3 e 4.	76
Figura 56 – Gradiente de durezas entre as amostras.	77
Figura 57 – Gráfico de dispersão de dados das microdurezas.....	78
Figura 58 – Gráfico comparativo da diferença de quantidade de passes de soldagem para cada processo.	79
Figura 59 - Gráfico comparativo da diferença de tempo total de processo de cada amostra. ..	80
Figura 60 - Gráfico comparativo de velocidade de soldagem entre os processos.	81
Figura 61 - Gráfico comparativo de consumo de arame entre os processos.	81
Figura 62 - Gráfico comparativo de consumo de arame entre os processos.	82
Figura 63 – Gráfico de custo com materiais (arame e gás) para realizar 1 metro de soldagem em cada processo.....	82
Figura 64 – Projeção de redução de custo para cada processo no ano de 2024	83
Figura 65 - Gráfico de comparação das taxas de deposição entre os processos.....	83
Figura 66 - Gráfico de comparação dos aportes térmicos médios entre os processos.	84
Figura 67 - Gráfico de dispersão dos aportes térmicos dos processos	84
Figura 68 - Gráfico de comparação dos aportes térmicos totais entre os processos.	85
Figura 69 - Gráfico de comparação das temperaturas de interpasse entre os processos.	85
Figura 70 – Gráfico de comparativo de empenamento entre as amostras	86
Figura 71 – Gráfico comparativo dos custos de implementação dos 3 processos testados.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação do arame tubular com MAG, eletrodo revestido e arco submerso.....	25
Tabela 2 - Resultados de estudos de produtividade entre FCAW e GMAW.	30
Tabela 3- Comparação do tempo e material requeridos consumidos para soldagem de 1 metro de junta com HLAW e GMAW.....	32
Tabela 4 - Requisitos de entrada de calor e sequências sugeridas de passes e camada para múltiplas classificações de eletrodos.	35
Tabela 5 - Temperaturas (°C) mínimas de pré-aquecimento e interpasse especificadas para a soldagem de aços-carbono e carbono-manganês.....	37
Tabela 6 – Especificações do material SAC-RAND-350 (Certificado de matéria prima).....	40
Tabela 7 – Composição química, especificações mecânicas e deposição do arame ER 80 S-G.	40
Tabela 8 - Composição química, especificações mecânicas e deposição do arame E81T1-C1A2-W2	41
Tabela 9 – Parâmetros gerais controlados em cada processo.	45
Tabela 10 – Parâmetros utilizados nos testes de soldagem.	46
Tabela 11 – Variações testadas no processo híbrido	49
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração das quatro amostras.	61
Tabela 13 – Dados de transformação de fase, tempo de resfriamento, estimativa de dureza na ZTA e volume de martensita para cada amostra.	68
Tabela 14 – Custos para implementação do processo HLAW.	87
Tabela 15 - Resultados medidos nas macrografias das 4 amostras.	95
Tabela 16 - Resultados obtidos durante monitoramento de cada processo.	96
Tabela 17 – Resumo do teste anova.	97
Tabela 18 – Resultado do teste anova.	97
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de microdureza Vickers.	98
Tabela 20 – Resumo do teste anova.	99
Tabela 21 – Resultado do teste anova.	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo comparativo de vantagens e desvantagens dos processos GMAW, FCAW e Híbrido LASER-MAG.....	28
Quadro 2 - Tabela de soldabilidade baseada em carbono equivalente.....	33
Quadro 3 – Equipamentos utilizados por processos.....	42
Quadro 4 – Diferentes amostras executadas.....	45
Quadro 5 – Corpos de prova para análise de laboratório de cada amostra.....	50
Quadro 6 – Resultado dos ensaios de dobramento lateral para as quatro amostras.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ac1	Temperatura final da transformação austenítica
AC1	Altura cordão 1
AC2	Altura cordão 2
Ac3	Temperatura inicial da transformação austenítica
AF	Ferrita acicular
AM	Amostra
ANOVA	Análise de variância
AR	Argentina
AR1	Altura do reforço
AR2	Altura da raiz
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
Ceq	Carbono equivalente
CP	Corpo de prova
CPS	Corpos de provas
e	Espessura
EPS	Especificação de soldagem
EUA	Estados Unidos da América
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
FS(A)	Ferrita com segunda fase alinhada
FS(NA)	Ferrita com segunda fase não alinhada
GC1	Penetração cordão 1
GC2	Penetração cordão 2
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GS	Garganta de solda
HLAW	<i>Hybrid Laser-Arc Welding</i>
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
LAMEC	Laboratório de Ensaios Mecânicos da UCS
LBW	<i>Laser Beam Welding</i>
LC1	Largura do cordão 1
LC2	Largura do cordão 2
LR1	Largura do reforço
LR2	Largura da raiz
M	Martensita
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal de base
Mf	Temperatura de transformação martensítica
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MS	Metal de solda ou metal de adição
P	Perlita
PF	Ferrita primária
PF(G)	Ferrita de contorno de grão
PF(I)	Ferrita poligonal intragranular

RS	Rio Grande do Sul
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SC	Santa Catarina
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SP	São Paulo
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UCS	Universidade de Caxias do Sul
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 AMBIENTE DE TCC	17
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 OBJETIVO GERAL.....	20
1.3.1 Objetivos específicos.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 CRONOLOGIA DA SOLDAGEM.....	21
2.2 SOLDAGEM NA INDÚSTRIA.....	21
2.3 JUNTA SOLDADA.....	22
2.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM	23
2.4.1 Processo de soldagem MIG/MAG(GMAW).....	23
2.4.2 Processo de soldagem FCAW	24
2.4.3 Processo de soldagem Híbrido LASER-MAG (HLAW).....	26
2.4.4 Comparação de velocidade e produtividade entre os processos.....	29
2.5 CARBONO EQUIVALENTE	33
2.6 SOLDAGEM EM CHAPAS GROSSAS	33
2.6.1 Aporte Térmico do material de adição	35
2.6.2 Temperaturas de interpasse e pré-aquecimento.....	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 METAL DE BASE.....	39
3.2 METAL DE ADIÇÃO.....	40
3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	41
3.4 CORPOS DE PROVA E PROJETO DA JUNTA.....	43
3.5 DESCRIÇÃO DOS TESTES	44
3.6 PARÂMETROS DO PROCESSO	45
3.7 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	47
3.7.1 Procedimentos GMAW e FCAW	47
3.7.2 Procedimento Híbrido HLAW (LBW+GMAW)	48
3.8 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CPS)	50
3.9 ENSAIOS DE QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM	52
3.9.1 Ensaio de Tração	53

3.9.2 Dobramento Lateral	54
3.10 ENSAIOS DE METALOGRAFIA	55
3.10.1 Macrografia	56
3.10.2 Micrografia	56
3.10.3 Microdureza	58
3.11 MEDIÇÃO DE EMPENAMENTO	59
4 RESULTADOS	60
4.1 ENSAIOS DE QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM	60
4.1.1 Ensaio de Tração	60
4.1.2 Dobramento Lateral	64
4.2 ENSAIOS DE METALOGRAFIA	65
4.2.1 Macrografia	66
4.2.2 Micrografia	68
4.2.3 Microdureza	77
4.3 COMPARAÇÕES PRODUTIVAS DOS PROCESSOS	79
4.4 CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO	86
4.5 PAYBACK DO INVESTIMENTO DO PROCESSO HLAW	87
5 CONCLUSÕES	89
5.1.1 Sugestão de Trabalhos Futuros	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE MACROGRAFIA	95
APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS NA EXECUÇÃO DOS PROCESSOS	96
APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA TRAÇÃO	97
APÊNDICE D – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE MICRODUREZA	98
APÊNDICE E – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA COMPARAÇÕES PRODUTIVAS DOS PROCESSOS	99
ANEXO A – CERTIFICADO DO METAL DE BASE	100
ANEXO B – CERTIFICADO DO ARAME SIDERWELD ER80-SG	101

ANEXO C – CERTIFICADO DO ARAME ESAB E81T1-C1A2-W2	102
--	------------

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o segmento de vagões ferroviários de carga é atendido atualmente por apenas duas empresas fabricantes, sendo uma delas a Randon SA Implementos e Participações. Este segmento é caracterizado pela produção de lotes sazonais de produtos, sob demanda de mercado. Assim, a Randon Implementos busca constantemente desenvolver ações que aumentem sua competitividade no mercado. Diferenciais como qualidade e produtividade possibilitam à empresa melhorar seus processos e suas margens de lucro em relação aos lotes de vagões ferroviários fabricados anteriormente.

Segundo a AWS (2001), *American Welding Society*, a solda é uma operação que visa obter a coalescência localizada através do aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de material de adição. Sendo assim, ela é utilizada para executar grande parte das operações de junção de metais na indústria.

Na Randon Implementos, os processos de fabricação mais comuns também utilizam a soldagem, que pode ser MIG, TIG, com arco submerso ou com eletrodo, dentre outros tipos. Adicionalmente, há outras variáveis envolvidas, como a velocidade empregada pelo soldador, o tipo de arame, o equipamento usado para executá-la e também parâmetros diversos, como a tensão e a corrente. Todas estas variáveis podem resultar em grandes desperdícios, tanto de consumíveis, quanto de tempos.

Os processos de soldagem da Randon Implementos, em geral, são empregados em chaparia grossa. Para o segmento ferroviário, a Randon Implementos passou a utilizar o processo de soldagem por arame tubular, pela sua maior penetração. Porém, a adesão a este processo ainda é incipiente, por apresentar maior dificuldade de soldagem, principalmente em soldagens fora da posição plana.

No processo de soldagem do último lote de vagões ferroviários produzidos pela empresa, o vagão *Sider FLF*, foram utilizados amplamente os aços ASTM A588, na espessura de 22,4 mm nas longarinas, que são o objeto de estudo deste trabalho. Já, para a união deste material, o arame utilizado foi o arame tubular 1,6 mm E81T1 W2, escolhido pela sua melhor penetração e melhor taxa de deposição em relação ao arame sólido.

Neste processo de soldagem, as chapas de 22,4 mm de espessura são unidas através da soldagem em uma junta de topo com chanfro V de 45°, que visa facilitar a penetração no momento da soldagem. Esta geometria de junta foi implementada recentemente.

A figura 1 mostra a junta neste processo. Observa-se, na geometria da junta, que devido à sua espessura, são necessários diversos passes para realizar o preenchimento de toda a garganta de solda da peça, sendo uma solda de multipasses.

Figura 1 - Peça original no processo atual



Fonte: O Autor (2022)

Em lotes anteriores, o processo de soldagem desta junta já foi realizado com chanfro duplo V de 45°, com arame sólido, sendo necessária a soldagem de um subconjunto antes de se realizar a fabricação da longarina. Este processo foi substituído devido à dificuldade de se obter a penetração total no momento da soldagem e por acrescer uma etapa a mais de montagem.

Ao mesmo tempo, no processo atual, esta junta é soldada quando a viga já está montada, evitando novos subconjuntos e economizando tempo de montagem, conforme pode ser visualizado na figura 1.

1.1 AMBIENTE DE TCC

A Mecânica Randon foi fundada no ano de 1949, pelos irmãos Raul Anselmo Randon e Hercílio Randon, como uma pequena oficina de reforma de motores industriais. Nos anos seguintes, passou a fabricar freios a ar, terceiros eixos para caminhões e, posteriormente, semirreboques. Da pequena oficina mecânica do passado ao grande complexo industrial de hoje, houve um crescimento exponencial, que tornou a marca Randoncorp um grupo brasileiro

representativo, com presença internacional, composto por várias empresas, abrangidas pelas verticais montadoras, autopeças e serviços, destacando-se a Randon Implementos, a Suspensys, a Castertech, a Jost, a Master e a Fras-le, dentre outras (Randon, 2023).

A Randon Implementos, responsável pela fabricação de implementos rodoviários, consolidou-se como uma das maiores fabricantes do segmento rodoviário na América Latina. Possui plantas instaladas nas cidades de Caxias do Sul (RS), Chapecó (SC), Araraquara (SP), Rosário (AR) e Nova Jersey (EUA). Há 19 anos, a Randon Implementos começou a atuar também no segmento ferroviário, produzindo vagões de carga e atingindo um *market-share* de aproximadamente 20% do mercado brasileiro, a partir da reativação da malha ferroviária no país (Randon, 2023). A Randon busca sempre atender às necessidades do mercado, contando hoje com plantas dedicadas à produção de vagões ferroviários, já tendo produzido mais de 11.000 mil unidades.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi realizado no setor de Engenharia de Processos da Randon Implementos, na cidade de Caxias do Sul (RS), mais especificamente no processo de Soldagem dos vagões ferroviários.

A linha de vagões *Sider* da Randon, que motivou os estudos deste trabalho, estava preparada para fabricar três produtos por dia, contando com uma linha de soldagem, uma de pintura e uma de montagem final.

A figura 2 mostra o vagão *Sider* FLF fabricado pela Randon em 2022.

Figura 2 - Vagão ferroviário *Sider* FLF fabricado pela Randon em 2022

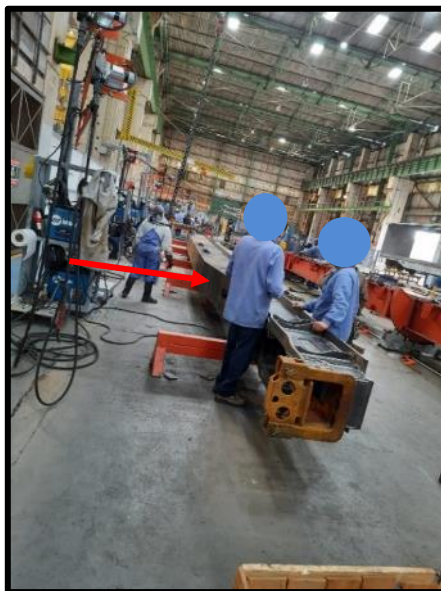


Fonte: Revista Ferroviária (2023)

O trabalho aqui apresentado foi desenvolvido no box de soldagem da viga do vagão, conforme figura 3, onde o processo de soldagem das longarinas é realizado. Na imagem, observa-se a longarina de um vagão apoiada sobre cavaletes e sendo preparada para receber a

soldagem de diversos pontos, incluindo a emenda das cintas de 22,4 mm, indicadas por uma seta.

Figura 3 - Box de soldagem de vigas do vagão *Sider* FLF



Fonte: O Autor (2022)

1.2 JUSTIFICATIVA

A junta apresentada possui alta espessura, o que demanda a utilização de um processo de soldagem multipasses, que, por sua vez, resulta na elevação da temperatura de soldagem e resfriamento posterior. Este processo pode transformar as fases do material, afetando seu desempenho com relação as propriedades mecânicas. Portanto, o controle do aporte térmico durante o processo de soldagem é de extrema importância. Este procedimento, muitas vezes, acaba resultando em tempos de processos elevados e em baixa produtividade.

As empresas que atuam neste mercado estão sempre buscando o aperfeiçoamento nos seus processos de manufatura, visando aumentar a produtividade. Desta forma, novas tecnologias surgem, são testadas e introduzidas nos processos de manufatura e uma destas tecnologias é o processo híbrido LASER-MAG, que também será objeto deste estudo.

O presente trabalho visa realizar comparações entre processos de soldagem desta junta ferroviária na busca da redução dos passes de soldagem. Serão comparados alguns processos na tentativa de melhorar a condição de operação, obter ganhos produtivos e de resistência mecânica. Para isto, serão utilizadas variações na geometria da junta soldada, nos consumíveis de solda, no tipo e composição do arame, ou até no processo de soldagem, e com isso, definir o processo que melhor se adequou para a junta estudada.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é comparar diferentes processos e tecnologias de soldagem que podem ser aplicados na união da cinta de uma longarina ferroviária, visando melhorar a produtividade.

1.3.1 Objetivos específicos

Do objetivo geral, derivam-se os específicos, sendo:

- a) realizar a revisão bibliográfica referente aos processos de soldagem;
- b) comparar diferentes processos de soldagem através de análises mecânicas e metalúrgicas;
- c) desenvolver a melhor metodologia de soldagem para a junta proposta;
- d) concluir sobre o processo mais produtivo ou com mais benefícios e seus custos de implementação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

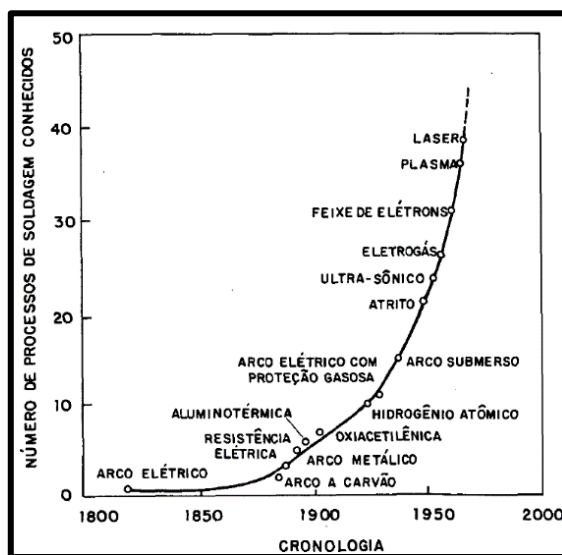
Neste capítulo, foi feita uma breve revisão sobre alguns conceitos e processos de soldagem que foram estudados neste trabalho e algumas particularidades da soldagem em chapas grossas.

2.1 CRONOLOGIA DA SOLDAGEM

Os processos de soldagem tiveram um grande impulso durante a II Guerra Mundial, ocasião em que se fabricavam navios e aviões de guerra. Ao longo de todos esses anos, os processos de soldagem vêm evoluindo em busca de melhores soluções de qualidade, resistência, durabilidade e produtividade para os diferentes tipos de materiais a serem unidos. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Na figura 4, segundo os autores, pode-se ver a evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos. Com a indústria automotiva em ascensão, destacaram-se os esforços para a pesquisa de novos processos, como é o caso do processo Laser, que promete uma produtividade elevada.

Figura 4 – Cronologia dos processos de soldagem



Fonte: Wainer, Brandi, Mello, (2004).

2.2 SOLDAGEM NA INDÚSTRIA

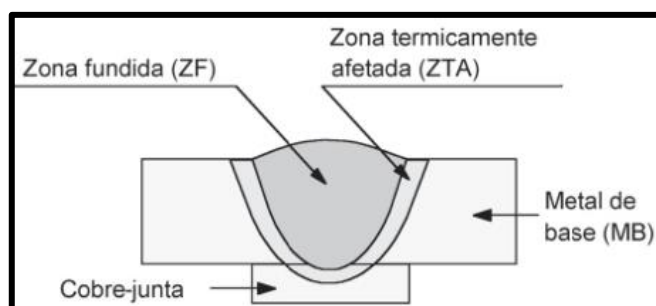
O processo de soldagem na indústria automotiva vem se aprimorando ao longo dos anos, buscando melhorar a qualidade e a produtividade. Este aumento de produtividade vem se

tornando viável graças à implementação de linhas robotizadas, que permitem reproduzir a soldagem por repetibilidade e escala dentro do mesmo padrão de qualidade, o que é mais complexo de se atingir com a soldagem manual (MARQUES *et al.* 2016). Conforme os autores, outro ponto que leva a indústria a implementar a robotização na soldagem é a dificuldade de se encontrar profissionais de soldagem no mercado. Concorrem para isso os riscos envolvendo a saúde, tais como a alta demanda física, exposição aos fumos de solda e radiações. Apesar de tudo, o principal processo de soldagem, tanto manual, quanto robotizado, ainda continua sendo o processo de solda a arco elétrico (GMAW), *Gas Metal Arc Welding*.

2.3 JUNTA SOLDADA

Para Marques *et al.* (2016), uma junta soldada pode ser dividida em 3 zonas: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base (MB), além da possibilidade, ou não, de se utilizar um cobre-junta. A figura 5 esquematiza a junta soldada.

Figura 5 – Nomenclaturas da junta soldada



Fonte: Marques *et al.* (2016)

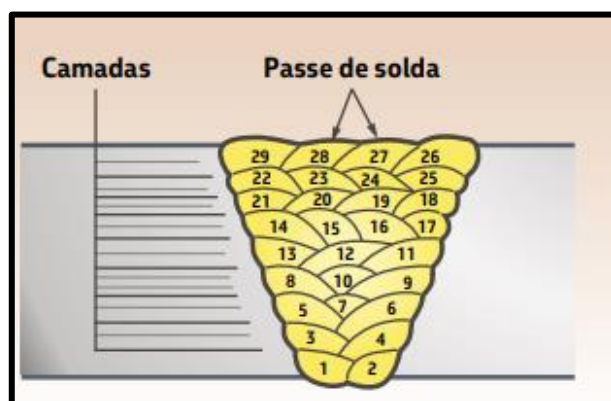
A ZF, região que chega ao estado líquido por algum momento durante o processo, voltando a se solidificar com a diminuição da temperatura, é uma mistura do metal de base e metal de adição (MS). A ZTA, zona onde ocorrem as modificações de estrutura do metal soldado, é causada normalmente pelo calor da solda. O metal de base (MB), também conhecido como zona não afetada, é o metal que não sofreu nenhuma alteração em suas propriedades durante o processo, com exceção das deformações mecânicas e a tensão residual (MARQUES *et al.* 2016).

O chanfro na junta soldada é uma preparação no metal de base para receber e conter a solda e garantir uma melhor união das peças. O preenchimento do chanfro, através do cordão de solda, é feito em passes. Passe é a progressão da operação de soldagem na junta. O primeiro passe de solda é conhecido como passe de raiz, pois preenche a abertura de raiz da junta,

normalmente contando com um cobre-junta na parte inferior das chapas a serem unidas (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Ainda para Rodrigues *et al.* (2022), multipasses são os diversos passes necessários para se preencher todo o chanfro das peças a serem unidas e, quanto mais passes são feitos, mais a temperatura aumenta. Uma solda multipasses normalmente é utilizada em processos de espessuras elevadas. A figura 6 define uma junta de topo soldada por multipasses.

Figura 6 – Soldagem multipasses



Fonte: Rodrigues *et al.* (2022)

2.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Para garantir a qualidade de uma junta soldada, de modo que atenda aos requisitos do projeto, é necessário fazer a seleção correta do processo de soldagem ao qual ela vai ser submetida. Ao longo dos anos, diversos processos foram surgindo, como o arco submerso, o laser, híbridos, além da própria automação dos processos, através da robotização. Para a situação da junta ferroviária objeto deste estudo, os processos testados serão detalhados a seguir.

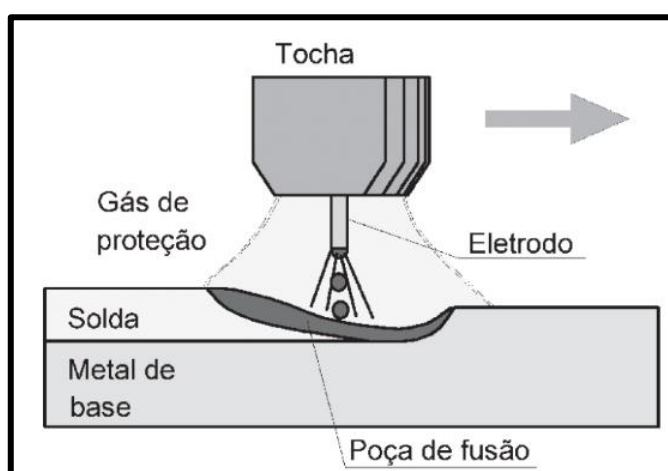
2.4.1 Processo de soldagem MIG/MAG(GMAW)

O processo GMAW utiliza como fonte de calor e energia um arco elétrico criado entre um eletrodo consumível e o metal de base. A energia liberada em forma de calor funde o eletrodo, que pode ser um arame em formato sólido ou *metal core* com enchimento metálico, com a superfície do metal de base, formando assim o metal de solda (MS). Ele é diferente do processo de soldagem *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), no qual o arame é alimentado continuamente, sem interrupções (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

A proteção do arco contra a atmosfera, no processo MIG/MAG, vem de um gás, ou mais de um, que podem ser inertes ou ativos, alimentados externamente junto à tocha de solda. Os gases inertes não reagem com o MS, e os comumente usados são o Argônio e o Hélio. Os gases ativos são os que reagem quimicamente de forma controlada com o MS. Eles podem ser o CO_2 , misturas de Ar ou He + CO_2 e, eventualmente, ainda podem conter O_2 ou N_2 (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Na figura 7, é observado todo o processo de arco elétrico descrito acontecendo: a tocha sendo alimentada com o MS, tocando o MB, formando um arco elétrico que faz a fusão dos materiais, criando a poça de fusão que solidifica com o resfriamento, gerando o cordão de solda.

Figura 7 – Processo de arco elétrico GMAW



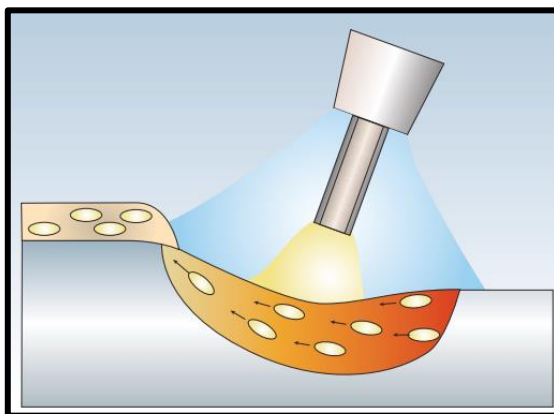
Fonte: MARQUES *et al.* (2016)

2.4.2 Processo de soldagem FCAW

Este processo, que é comumente conhecido por arame tubular, tem suas características muito parecidas com o processo de soldagem GMAW, ou seja, também utiliza como fonte de calor e energia um arco elétrico criado entre um eletrodo de arame, nesse caso, tubular *flux core*, e o metal de base (MARQUES *et al.* 2016). Ainda conforme os autores, este arame é alimentado sem interrupções durante o processo. O arame tubular FCAW contém em seu interior um material conhecido por “fluxo”, constituído de materiais inorgânicos e metálicos. A função deste composto na soldagem é possibilitar a melhoria das características do arco elétrico e da transferência do metal de solda, protegendo a poça de fusão, coletando as impurezas e formando a escória solidificada de solda.

A figura 8 mostra como as impurezas formam a escória durante o processo de soldagem com arame tubular.

Figura 8 – Impurezas do processo formando a escória no processo FCAW.



Fonte: Rodrigues *et al.* (2022)

Além da proteção do arco elétrico via fluxo, este processo também pode contar com a proteção adicional de um gás de solda, semelhante ao processo GMAW.

Algumas de suas vantagens em relação ao GMAW são a boa fusão, boa penetração e um melhor aspecto do cordão de solda, com possibilidade de utilização de maiores diâmetros de arames. Dependendo da regulagem da máquina, este processo pode gerar pouco ou nenhum respingo (RODRIGUES *et al.*, 2022).

A taxa de deposição e, conseqüentemente, a velocidade do processo FCAW são maiores em relação aos processos GMAW e SMAW, sendo seu principal diferencial (MARQUES *et al.*, 2016).

A tabela 1 compara a velocidade e deposição dos processos.

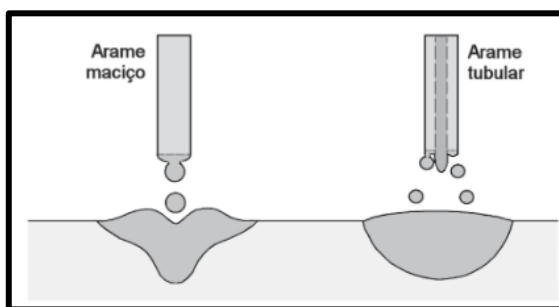
Tabela 1 - Comparação do arame tubular com MAG, eletrodo revestido e arco submerso

Processo	Taxa de deposição estimada (kg/h)
SMAW	0,5 a 3,0
GMAW	1,0 a 8,0
FCAW	2,0 a 12,0
SAW	3,0 a 20,0

Fonte: O autor, adaptado de Marques *et al.* (2016)

A figura 9 ilustra a diferença de penetração e de perfil de cordão de um processo FCAW para um processo GMAW.

Figura 9 – Diferença no perfil do metal de solda nas soldagens GMAW e FCAW.



Fonte: Marques *et al.* (2016)

No processo FCAW, o gás mais comum utilizado para a solda é o CO_2 , ou então, uma mistura de $Ar+CO_2$. As vantagens com relação ao uso da mistura são claras e justificam seu uso, mesmo com maior custo. Dentre estas vantagens, há menos respingos, menos geração de fumos de solda, o acabamento do cordão é superior, há uma melhor regulagem da fonte de solda, melhor penetração, além de ganhos em velocidade de soldagem. Como desvantagens, há mais calor gerado no processo e, eventualmente, pode ser necessário um sistema de refrigeração (RODRIGUES *et al.*, 2022).

O processo FCAW se beneficia das principais vantagens do processo MIG/MAG, como o fator de trabalho do soldador e a alta taxa de deposição e rendimento, somadas às vantagens do processo de eletrodo revestido, que são a versatilidade e o ajuste na composição química do metal de solda. Muitas vezes, o processo FCAW acaba sendo bastante superior em termos de flexibilidade e produtividade em relação aos processos eletrodo revestido e MIG/MAG (MARQUES *et al.* 2016).

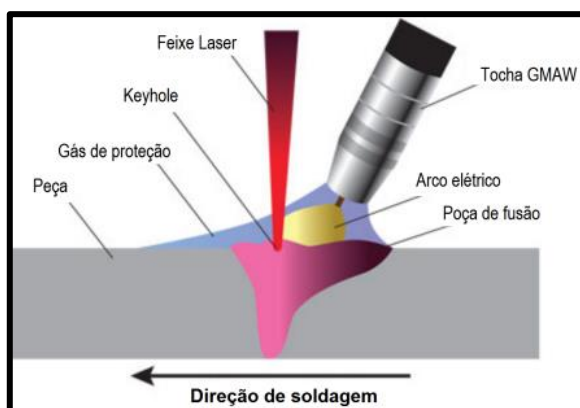
2.4.3 Processo de soldagem Híbrido LASER-MAG (HLAW)

Os processos de soldagem híbridos ainda não estão consolidados na indústria e sua implementação é muito onerosa. O estudo destes processos iniciou na década de 70 e seu princípio básico é a união de dois processos de soldagem com a intenção de aproveitar as melhores características de cada um. O foco atual de estudos em soldagem híbrida é o processo híbrido LASER-MAG, uma variante do processo MIG/MAG, que surgiu pelo interesse da indústria naval e automotiva. Este processo consegue entregar elevadas velocidades de soldagem em chapas grossas em apenas um passe (RODRIGUES *et al.*, 2022).

O processo híbrido de junção de LASER autógeno e MAG permite uma maior velocidade de soldagem, se comparado ao MAG convencional, podendo chegar a 800 cm/min, e possui uma maior tolerância a desalinhamentos da junta, quando comparado ao LASER

autógeno. O processo híbrido tem a largura da solda controlada pelo processo MAG e a profundidade da penetração da solda determinada pelo feixe de laser. O plasma criado pelo laser é intensificado pelo arco elétrico, gerando uma maior eficiência térmica (MARQUES *et al.* 2016). A figura 10 exemplifica o processo.

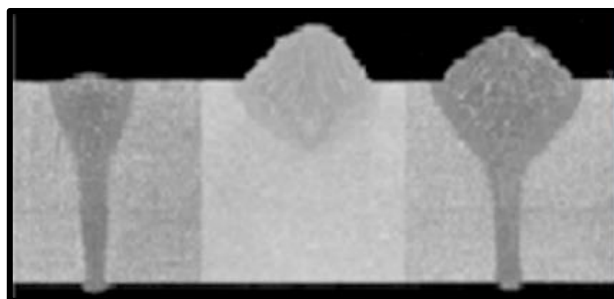
Figura 10 – Processo híbrido LASER-MAG.



Fonte: The Lincoln Electric Company, (2011), traduzido por Rodrigues *et al.* (2022)

A figura 11 mostra a análise de macrografia realizada, evidenciando a largura da solda controlada pelo processo MAG e a profundidade pelo processo laser.

Figura 11 – Macrografias do processo laser na esquerda, MAG no centro e híbrido LASER-MAG na direita.



Fonte: Senai (2011)

Segundo estudos de Deepak, Raja, Soundararajan e Bhumireddy (2021), a soldagem por laser em aços patináveis afeta menos as propriedades metalúrgicas e mecânicas, devido a uma menor temperatura de soldagem e uma menor área afetada, tornando-se um processo mais confiável para este material. Em outros processos, a temperatura elevada ao redor da ZTA, após a soldagem, muitas vezes, não torna este aço confiável após o seu processamento.

Para os autores, na soldagem laser em aços patináveis, as juntas de solda com feixe laser têm um acabamento mais atraente e uma ZTA estreita. Comparando-se uma peça sem soldagem de aço patinável com uma peça unida por solda laser, a soldada por laser demonstrou resistência à tração da junta quase equivalente àquela sem solda.

A solda à laser pode ser uma alternativa para chapas grossas, segundo Gorni, Silveira e Reis (2006). Para eles, a soldagem a laser em chapas grossas possui algumas vantagens, como: menores níveis de distorção das peças, maior produtividade e zona termicamente afetada mais estreita e homogênea, devido ao menor aporte térmico. Porém, é limitada a materiais não-ligados e com teores de carbono máximos entre 0,12 e 0,15%, para reduzir o risco de trincamento a frio. Também, os teores máximos de P e S são limitados à, respectivamente, 0,010-0,018% e 0,005-0,017%, para evitar problemas como porosidades (GORNI; SILVEIRA; REIS, 2006).

No quadro 1, é possível visualizar um resumo comparativo das vantagens e desvantagens dos processos revisados bibliograficamente acima.

Quadro 1 – Resumo comparativo de vantagens e desvantagens dos processos GMAW, FCAW e Híbrido LASER-MAG.

	Vantagens	Desvantagens
MIG/MAG	Soldagem em todas as posições	Maior velocidade de resfriamento por não haver escória, aumenta ocorrência de trincas
	Boa taxa de deposição	Deve-se proteger de correntes de ar
	Sem formação de escória, sem necessidade de remoção ou risco de inclusão de escória em soldagem de vários passes	Projeção de gotas de metal líquido durante o processo
	Visibilidade total da poça de fusão	Emissão de raios ultravioleta elevados
		Controle de temperatura em soldas de diversos passes
Arame Tubular	Velocidade de soldagem em relação ao GMAW	Na soldagem com várias camadas é necessário remover a escória após cada passe
	Taxa de deposição em relação ao GMAW	Controle de temperatura em soldas de diversos passes
	Penetração em relação ao GMAW	Emissão de raios ultravioleta elevados
	Visibilidade total da poça de fusão	
	Velocidade de resfriamento menor em relação ao GMAW	
	Menor quantidade de respingos de solda	
Híbrido LASER-MAG	Melhor aspecto do cordão de solda	
	Aberturas de raízes desalinhadas	Altos custos operacionais
	Menores tempos e custos de fabricação	Excesso de geração de fumos metálicos e salpicos podem danificar as lentes
	Soldagem de peças espessas em um único passe	Número de variáveis de soldagem aumenta
	Permite aumentar a velocidade de soldagem com redução do aporte térmico, aumento de penetração, redução da largura do cordão e menor distorção	Impacto direto na segurança, laser pode causar cegueira, necessário enclausuramento
	Alta produtividade	Cabeçote pesado, necessita mecanização ou automação
	Permite certa independência entre a velocidade de fusão do arame e do aporte térmico	Restrito a espessuras menores que 30 mm

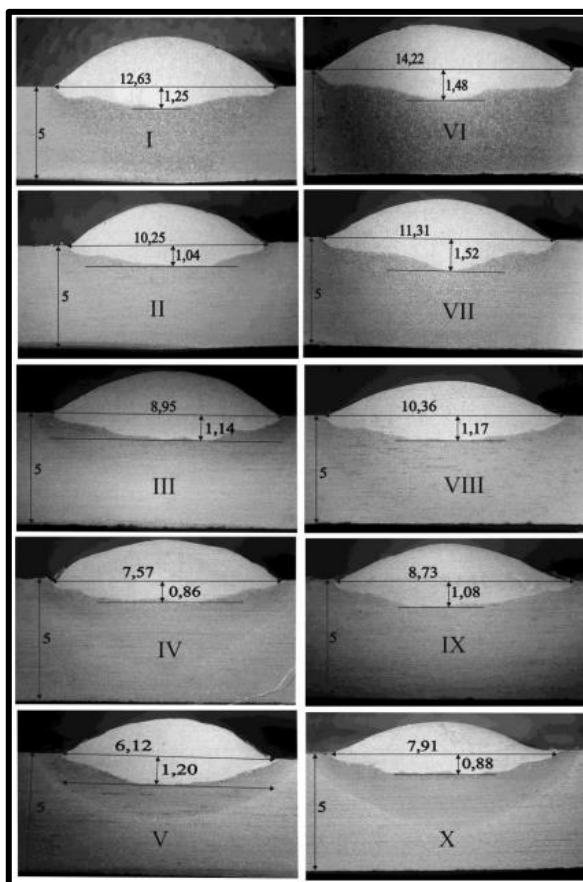
Fonte: O autor (2023)

2.4.4 Comparação de velocidade e produtividade entre os processos

Lermen (2011) realizou um estudo comparativo entre o processo de arame tubular (FCAW) e o processo híbrido (FCAW-TIG), com corpos de provas iguais, os mesmos parâmetros de soldagem FCAW e as mesmas velocidades. Após as soldagens realizadas, o autor concluiu que o processo híbrido gerou cordões mais largos em mesmas velocidades. A penetração do cordão de solda também foi maior no processo híbrido, exceto na velocidade de 1,14 mm/s. Esse estudo mostrou que o processo híbrido pode atingir as geometrias e características necessárias ao projeto mais rapidamente do que o processo convencional. Conforme o autor, o processo híbrido mostrou ser mais produtivo em relação a FCAW.

A figura 12 mostra os ganhos obtidos por Lermen (2011), onde as amostras de I à V são FCAW e VI à X são FCAW-TIG e as velocidades são as seguintes: 0,30 mm/s (I e VI); 0,46 mm/s (II e VII); 0,63 mm/s (III e VIII); 0,87 mm/s (IV e IX) e 1,14 mm/s (V e X).

Figura 12 – Velocidades obtidas nos testes de FCAW x FCAW-TIG



Fonte: Lermen (2011)

Através de um estudo comparativo, Garcia e Scotti (2011) mostraram que o processo GMAW é menos produtivo, se comparado ao processo FCAW, porém consome menos

material. Em seu estudo, foi desenvolvida uma metodologia para facilitar e tornar a comparação assertiva. A metodologia envolveu a padronização dos parâmetros, como bitolas de arame fixadas em 1,2 mm e a utilização dos mesmos gases, sendo 100% CO_2 e 75% Ar + 25% CO_2 . Foram respeitadas as variáveis específicas de cada processo sugeridas pelos fabricantes dos eletrodos, como a vazão e a distância do bico de soldagem, para se obter o mesmo volume de cordão em um mesmo comprimento, com posterior determinação da taxa de fusão e deposição.

Segundo Garcia e Scotti (2011), os resultados obtidos através dos cálculos mostraram que o arame tubular obteve uma maior taxa de fusão e deposição em relação ao arame sólido e, com isso, uma maior velocidade de soldagem. Entretanto, a eficiência de deposição foi menor em relação ao sólido, sendo depositado menos material do que o fundido, pois possui em seu processo os fumos de solda e escória inseridos no cálculo. Já, no sólido, esse valor foi mais equilibrado.

Os autores complementam que, com o arame tubular, foi possível realizar um cordão de mesmo volume e comprimento mais rapidamente, porém, devido à sua eficiência menor, ele consumiu mais material para preencher o cordão. Como o custo do arame tubular é maior em relação ao sólido, os autores questionaram se a aplicação de um arame tubular realmente vale a pena. A tabela 2 mostra os resultados obtidos por Garcia e Scotti (2011).

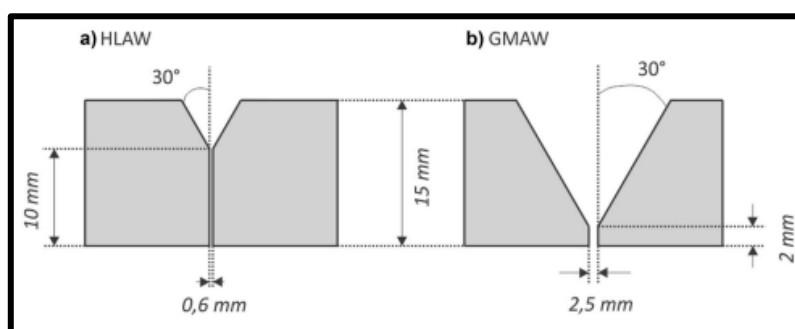
Tabela 2 - Resultados de estudos de produtividade entre FCAW e GMAW.

	Teste	U _{Ref} [V]	V _{sol} [cm/min]	U [V]	I [A]	TF [g/min]	Td [g/min]	η D [%]	TD [g/cm]	
Tubular	100%CO ₂	Teste 1	25	25	25,4	148	37,29	32,04	85,9	1,28
		Teste 2	27	38	27,2	204	59,28	50,39	85	1,33
		Teste 3	30	52	30,5	254	79,39	66,65	84	1,28
		Teste 4	32	69	32,4	304	106,26	92,49	87	1,34
	Ar+25% CO ₂	Teste 5	25	24	25,2	149	34,53	30,05	87	1,25
		Teste 6	27	35	27,5	202	53,4	47,2	88,4	1,35
		Teste 7	30	48	30,7	253	71,47	61,97	86,7	1,29
		Teste 8	32	66	32,5	307	100,51	88,32	88	1,34
Maciço	100%CO ₂	Teste 9	21	19	21,5	149	28,54	26,68	93,5	1,4
		Teste 10	23	31	23,3	204	45,66	43,38	95	1,4
		Teste 11	25	41	25,2	253	58,76	55,24	94	1,35
		Teste 12	29	52	29,1	300	74,73	71,3	95,5	1,37
	Ar+25% CO ₂	Teste 13	19	18	19,6	148	25,85	24,2	93,6	1,27
		Teste 14	21	28	21,5	195	39,63	37,85	95,5	1,35
		Teste 15	21	41	21,4	247	57,5	54,63	95	1,33
		Teste 16	27	52	27,3	304	75,46	73,2	97	1,4

Fonte: Garcia e Scotti (2011).

Para consolidar a vantagem produtiva do processo HLAW, *hybrid laser-arc welding*, em relação aos processos GMAW e LBW, *laser beam welding*, Silva, Rodrigues, Pereira e Faes (2022), fizeram um estudo comparativo entre a produtividade destes processos. O estudo foi baseado em chapas metálicas com 15 mm. A soldagem foi feita na posição plana, de 3 diferentes formas, uma no processo HLAW, outra no processo LBW e a última no processo GMAW, variando entre cordão de solda de filete e cordão de solda com tecelagem. No processo LBW, foi observada a dificuldade em atingir a penetração total, e as folgas entre as peças também se mostraram inviáveis. No processo HLAW, foi percebida a necessidade de uso de cobre-junta sobre a junta, para não haver vazamento da poça de fusão. Além disso, foi necessária uma folga entre as peças de 0,6 mm e um pequeno chanfro de 5 mm para melhor penetração e acabamento da junta soldada. No processo GMAW, o chanfro precisou ser bem maior, em função da dificuldade de penetração, assim como a folga, de 2,5 mm, também foi maior. A figura 13 ilustra as diferenças entre as juntas necessárias para cada processo.

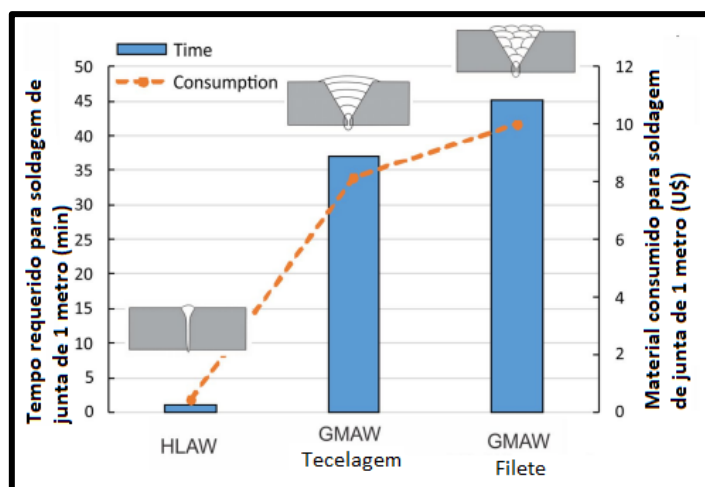
Figura 13 – Perfil geométrico das juntas dos processos: a) HLAW e b) GMAW



Fonte: Silva, Rodrigues, Pereira e Faes (2022)

Como resultado, Silva, Rodrigues, Pereira e Faes (2022) obtiveram diferenças expressivas na produtividade destes processos. No processo HLAW, foi possível atingir a soldagem da junta de 15 mm por inteiro em um único passe de solda. Nas duas variações do processo GMAW, foram necessários diversos passes de solda para preenchimento total. O processo híbrido apresentou um ganho de aproximadamente 40 vezes sobre o tempo de soldagem do processo GMAW convencional, além de um menor consumo de gás e material. A figura 14 ilustra todas essas diferenças na produtividade dos processos.

Figura 14 – Comparação do tempo e material requeridos consumidos para soldagem de 1 metro de junta com HLAW e GMAW.



Fonte: Silva, Rodrigues, Pereira e Faes (2022), traduzido pelo autor (2023)

A tabela 3 apresenta as comparações entre tempo de solda, arame consumido, consumo de gás e total de material consumido, evidenciando a diferença grande entre a produtividade destes 2 processos.

Tabela 3- Comparação do tempo e material requeridos consumidos para soldagem de 1 metro de junta com HLAW e GMAW.

	HLAW	GMAW com filete de solda	GMAW com solda por tecelagem
Tempo de solda - 1 metro (min)	1,00	37,04	45,19
Consumo de arame - 1 metro (U\$)	0,33	5,28	6,44
Consumo de gás de proteção - 1 metro (U\$)	0,11	2,91	3,55
Total de consumo de material - 1 metro (U\$)	0,43	8,19	9,99

Fonte: Silva, Rodrigues, Pereira e Faes (2022), traduzido pelo autor (2023)

O estudo de Farias, Silva, Figueredo, Pereira e Silva (2021), mostrou que em uma chapa de 16 mm, soldada por arco submerso tandem, que é o processo de arco submerso com 2 arames, foi possível atingir a penetração total da chapa em 2 passes, um de cada lado da peça, na velocidade de 1,2 metros em 1 minuto. Se comparado aos valores do quadro 2, em questão de 2 minutos, seria possível se obter uma solda com penetração total de 1 metro aproximado, se assemelhando muito ao processo híbrido.

2.5 CARBONO EQUIVALENTE

Para Rodrigues *et al.* (2022), a soldabilidade é um conceito difícil de ser expresso, pois sofre a influência de diversas variáveis como: fatores térmicos, características do material, processo de soldagem utilizado, projeto da junta e facilidade operacional do soldador com relação à técnica. A soldagem não deve apresentar falhas e deve atender aos requisitos mínimos de tensão e tenacidade exigidos pelos códigos de projeto nas condições da operação.

A soldabilidade de um aço carbono é comumente definida em um cálculo teórico conhecido por carbono equivalente. Ele é uma medida que determina o quanto cada elemento de liga influencia na temperabilidade do material.

Segundo Dearden e O'Neill (1940), o cálculo de carbono equivalente é definido conforme a equação 1:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \quad (1)$$

O carbono equivalente define a soldabilidade do material, conforme o quadro 2:

Quadro 2 - Tabela de soldabilidade baseada em carbono equivalente.

$C_{eq} < 0,40$	Boa Soldabilidade
$0,40 \leq C_{eq} \leq 0,60$	Média Soldabilidade
$C_{eq} > 0,60$	Má Soldabilidade

Fonte: Dearden e O'Neill (1940)

Quanto menor for o carbono equivalente, menor é a probabilidade de ser obtida uma microestrutura martensítica e, conseqüentemente, melhor é a soldabilidade do aço. Porém, essa avaliação teórica não é definitiva, é preciso avaliar caso a caso, pois existem outras variáveis como: o material, as condições de soldagem e a aplicação do componente soldado (DEARDEN e O'NEILL, 1940).

2.6 SOLDAGEM EM CHAPAS GROSSAS

Na soldagem em chapas grossas, é necessário ter cuidado com o aporte térmico e a energia liberada durante o processo, devido a este tipo de solda, conhecida por multipasses, possuir vários cordões de solda. No decorrer do processo, se o metal de solda passar de uma determinada temperatura, podem acontecer transformações de fase do material, devido aos

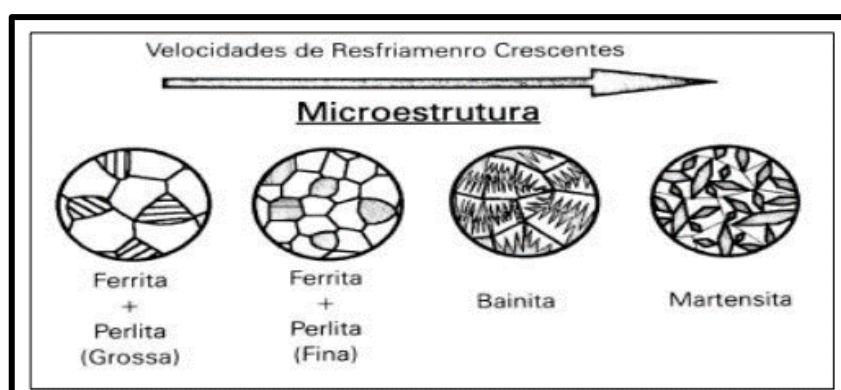
ciclos térmicos do processo. Nem sempre essas alterações e transformações na estrutura e nas propriedades do metal de base são aceitáveis ao conjunto soldado (MARQUES *et al.* 2016).

Os metais se solidificam na forma de cristais. Quando recebem aporte térmico ou energia, suas moléculas se agitam, modificando a rede cristalina do metal, fazendo ele se fundir. No caso dos aços-liga, que contém mais de um elemento diferente, o ponto de fusão pode ser bastante elevado, fazendo com que o mesmo não se funda por completo e possua uma mistura de líquido e sólido em determinadas temperaturas. Cada metal possui sua estrutura cristalina e, quando se eleva a temperatura, o que acontece é a de mudança de fase (FORTES, 2004).

Nas soldagens multipasses, as transformações no aquecimento, as fases formadas na fusão, a solidificação e as transformações de fases no resfriamento, indicam o desempenho da junta soldada com relação a propriedades mecânicas, determinando se a estrutura final da solda será grosseira ou refinada. Esses fenômenos sugerem que, quanto maior o tamanho de grão, menor é a quantidade de contornos por unidade de volume e mais lenta é a decomposição da austenita em ferrita (CAMPOS, 2005).

Ainda segundo Marques *et al.* (2016), existe uma fase não prevista nos diagramas Fe-C, a chamada martensita, obtida através de velocidades de resfriamentos crescentes. Nessa fase, a microestrutura do aço tem forma de agulhas e apresenta uma grande dureza, deixando-a com característica muito frágil. A figura 15 mostra as transformações de fase que o aço pode sofrer de acordo com o calor, o teor de carbono e as velocidades de resfriamento.

Figura 15 – Diagrama da microestrutura de um aço em função da velocidade de resfriamento após a austenitização.



Fonte: Marques *et al.* (2016)

Para controlar a temperatura de uma junta soldada é necessário determinar a energia de soldagem. Desta forma, é possível fazer comparações entre os diferentes procedimentos de soldagem, onde parâmetros distintos são utilizados. A determinação da energia de soldagem tem importância para o estudo da soldagem, pois influencia nas propriedades mecânicas e

morfológicas dos conjuntos soldados e também na estrutura de solidificação, devido às alterações provocadas no gradiente térmico da poça de fusão (KOU, 2002).

2.6.1 Aporte Térmico do material de adição

Segundo AWS (2016), para soldas com múltiplos passes com arame tubular, existe um cálculo de entrada de calor e um padrão de sequência de passes de solda que deve ser seguido, para que o material de adição mantenha seu resfriamento e aquecimento controlado, fazendo o controle metalúrgico do material e evitando precipitações de fases indesejadas ao processo. Essa sequência de passes pode ser vista na tabela 4.

Tabela 4 - Requisitos de entrada de calor e sequências sugeridas de passes e camada para múltiplas classificações de eletrodos.

Diâmetro mm	Entrada de calor médio requerido kJ/mm	Sugestão de passes por camadas		Sugestão de números de camadas
		Camada 1	Camada 2 até o topo	
≤0,8 0,9	0,8-1,4	1 ou 2	2 ou 3	6 à 9
1 1,2	1,0-2,0	1 ou 2	2 ou 3	6 à 9
1,4 1,6	1,0-2,2	1 ou 2	2 ou 3	5 à 8
1,8 2	1,4-2,6	1 ou 2	2 ou 3	5 à 8

Fonte: O autor (2023), adaptado de AWS A5.36 (2016).

A norma AWS A5.28, para arames sólidos, não conta com a informação de entrada média de calor, portanto, para fins de comparação, utiliza-se a mesma informação do arame tubular.

Para descobrir o valor do aporte térmico do material em kJ/mm, conforme o quadro 5, deve-se usar a equação 2:

$$\text{Aporte Térmico}_{\text{GMAW}}_{\text{kJ/mm}} = \frac{\text{tensão} \cdot \text{corrente} \cdot 60}{\text{velocidade de solda} \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) \cdot 1000} \quad (2)$$

O valor do aporte térmico mostra que a junta soldada, com alguns parâmetros de solda definidos pelo fabricante do arame, tem uma energia de trabalho definida. O ideal é que ela não varie nem para mais e nem para menos do que o especificado. Se o processo tiver menos energia do que o necessário, a taxa de resfriamento será mais rápida, podendo o aço sofrer alteração de

microestrutura. Se tiver mais energia do que o necessário, as chances de alteração de microestrutura são menores, porém, excessos de temperatura e energia impedem uma solda de qualidade. Cada processo distinto conta com uma densidade de energia liberada durante a sua ocorrência. Basicamente, quanto maior for a densidade de energia, melhor será a qualidade, a velocidade e a penetração da solda, mas, o custo do equipamento e do procedimento também serão maiores (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Ainda segundo Rodrigues *et al.*, (2022), à medida que a espessura da peça aumenta, o gradiente de temperatura e a velocidade de resfriamento também aumentam. O volume maior de material faz com que ele dissipe o calor mais facilmente, portanto, é uma condição ainda mais imprópria para soldagem sem que ocorra a alteração de microestrutura.

Existem três maneiras de se baixar a velocidade de resfriamento da solda. São elas: aumento de aporte térmico, diminuição da espessura ou pré-aquecimento da peça. O grande desafio da soldagem multipasses em grandes espessuras, quando se fala em alterações de fase do metal, é que cada passe superponha seu ciclo térmico aos precedentes, provocando a evolução no material de solda das estruturas e propriedades. Cada passe terá uma influência maior na temperatura do que o passe anterior, mostrando que, caso o tempo entre esses passes seja pequeno, a temperatura inicial de cada passe vai aumentar, diminuindo a velocidade de resfriamento (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Diminuir a velocidade de resfriamento pode parecer interessante quando se trata de alteração de fase, porém, nessa situação, devido à permanência do metal de solda em altas temperaturas, a ZTA pode voltar a ultrapassar a temperatura de transformação, e seus grãos também irão aumentar excessivamente. O que foi criado para a prevenção dessa situação é o limite superior de temperatura entre os passes de solda, conhecida como temperatura de interpasse. (RODRIGUES *et al.*, 2022).

2.6.2 Temperaturas de interpasse e pré-aquecimento

Com base nas definições de estrutura cristalina dos metais e soldagem multipasses, chega-se ao conceito de temperatura de interpasse. Segundo Gouveia (2008), a temperatura de interpasse é um limite inferior e superior utilizado entre os passes de uma soldagem. Ainda, segundo ele, possibilita manter o resfriamento e o aquecimento controlado durante todo o tempo do processo, possibilitando um maior controle metalúrgico do material e evitando precipitações de fases indesejadas ao processo. Respeitando a temperatura de interpasse, evita-se a concentração de tensão na soldagem, facilitando a difusão do hidrogênio para fora da solda.

O calor gerado nos processos de soldagem é escoado por todo o metal de base, ocorrendo resfriamentos rápidos, principalmente nas espessuras grossas, quando não são pré-aquecidas antes da solda. A ideia do pré-aquecimento é diminuir a velocidade com que o metal de solda resfria, prevenindo contra a formação de trincas induzidas por hidrogênio. Fazendo isso, é possível diminuir a quantidade de martensita na ZTA e favorecer o escape de hidrogênio para a atmosfera (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Segundo a norma Petrobras N133(2023), a soldagem não deve ser executada quando a superfície da peça, numa faixa de 150 mm, centrada na junta a ser soldada, estiver úmida ou abaixo da temperatura de pré-aquecimento estabelecida para o material. Caso o pré-aquecimento não seja requerido, a temperatura da superfície a ser soldada não pode ser inferior a 10 °C e, neste caso, a superfície deve ser preaquecida a 50 °C.

As temperaturas de interpasse e pré-aquecimento de aços-carbono podem ser vistas na tabela 5.

Tabela 5 - Temperaturas (°C) mínimas de pré-aquecimento e interpasse especificadas para a soldagem de aços-carbono e carbono-manganês

Carbono Equivalente - C_{eq}	Espessura calculada da junta soldada, e [mm]		
	$e \leq 20$	$20 < e \leq 30$	$e > 30$
$C_{eq} \leq 0,41\%$	-	-	(75 °C)
$0,41\% < C_{eq} \leq 0,43\%$	-	(50 °C)	100 °C
$0,43\% < C_{eq} \leq 0,45\%$	(50 °C)	(100 °C)	100 °C (125 °C)
$0,45\% < C_{eq} \leq 0,47\%$	10 °C (mín.) (100 °C)	100 °C (125 °C)	125 °C (150 °C)
$0,47\% < C_{eq} \leq 0,50\%$	100 °C (125 °C)	125 °C (150 °C)	150 °C (175 °C)

Fonte: Petrobras (2023)

Também, segundo Petrobras (2023), os valores entre parênteses aplicam-se às estruturas metálicas marítimas e aços de alta resistência. Quando não houver requisito de tenacidade, a temperatura de interpasse do material de base não deve exceder 315 °C.

Segundo a norma AWS D1.1 (2020), a temperatura de interpasse e pré-aquecimento do aço ASTM A588 para qualquer processo de soldagem na espessura de 3 a 20 mm é de 0 °C, nas espessuras de 20 a 38 mm é de 10 °C e nas espessuras de 38 até 65 mm é de 65 °C.

Através do resultado obtido por Laitila e Larkiola (2019) em um experimento, do ponto de vista das propriedades mecânicas, é interessante adicionar um sistema de resfriamento externo ao processo de soldagem. No processo de multipasses, quando a junta foi resfriada de maneira forçada até 100 °C, após um passe de solda, antes de se iniciar o passe seguinte, a ZTA melhorou significativamente, apresentando uma microestrutura melhor, comparada ao processo

sem resfriamento, além de se conseguir eliminar um certo tempo de espera entre os passes, tornando a operação mais produtiva.

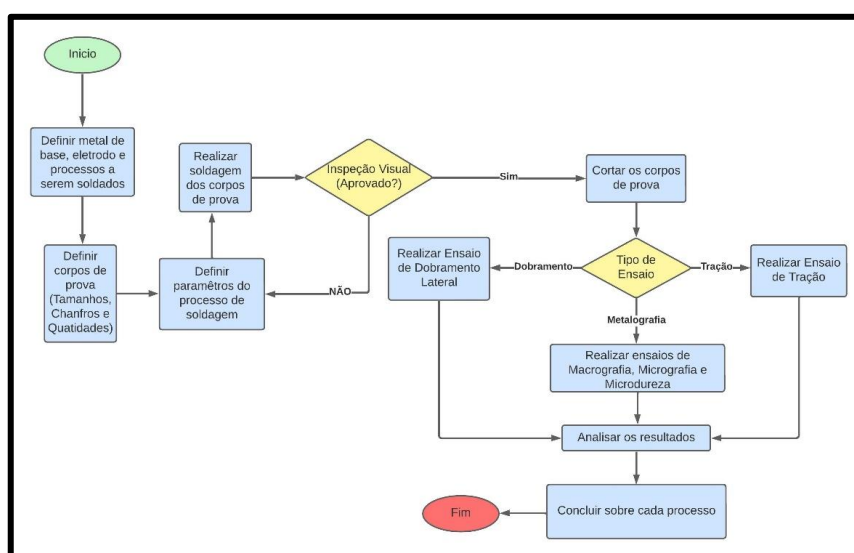
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trouxe a descrição dos materiais e métodos aplicados ao trabalho. Ele foi estruturado por meio de seções que demonstram os parâmetros como: metal de base, metal de adição e também a metodologia dos procedimentos de soldagem.

Também foi apresentada a metodologia dos ensaios experimentais de laboratório que foram utilizados na comparação das amostras submetidas aos procedimentos de soldagem.

Na figura 16, é apresentado o fluxograma definido para todo o andamento do trabalho.

Figura 16 – Fluxograma do trabalho de conclusão



Fonte: O autor (2023)

3.1 METAL DE BASE

O metal de base utilizado para a realização dos testes deste trabalho foi o material SAC-RAND-350, um aço equivalente ao aço ASTM A588, com espessura de 22,4 mm. Este aço é muito utilizado em aplicações que demandam resistência à corrosão atmosférica, como os vagões ferroviários, os quais normalmente rodam em ferrovias, sem pintura e expostos ao clima, necessitando de proteção superficial especial.

Este aço entra na classificação dos aços patináveis, que são aços que autoformam uma camada superficial protetora conhecida como “pátina”, resistente à corrosão atmosférica, fazendo com que ele tenha uma perda de massa menor do que um aço convencional, quando exposto ao tempo.

Sua composição química e suas propriedades mecânicas estão apresentadas conforme a tabela 6, retiradas do certificado do material enviado pelo fornecedor:

Tabela 6 – Especificações do material SAC-RAND-350 (Certificado de matéria prima)

Material	Dimensões nominais	Composição química (% em massa)								
		Carbono C	Manganês Mn	Fósforo P	Enxofre S	Silício Si	Níquel Ni	Cromo Cr	Cobre Cu	Ceq
AÇO SAC-RAND-350 (ASTM A588)	22,40 x 2400,0 x 6000 mm	0,14	1,34	0,039	0,004	1,17	0,02	0,2	0,1	0,41
		Propriedades mecânicas								
		LE(MPa)			LR (MPa)			Alongamento (%)		
		416			582			28		

Fonte: O autor (2023), adaptado de USIMINAS.

Estas características o diferenciam do aço carbono A36. Para Dutra *et al.* (2013), o aço patinável pode apresentar uma resistência até oito vezes maior que a dos aços-carbono convencionais.

3.2 METAL DE ADIÇÃO

Para efeito de comparação durante o trabalho, foram efetuados testes de soldagem com arames sólidos e tubulares *flux core*. Os metais de adição avaliados e comparados foram o arame sólido cobreado ER 80 S-G ligado níquel-cobre, da marca italiana *Sider Weld*, destinado à soldagem de aços patináveis, e o arame tubular E81T1-C1A2-W2, da marca ESAB. A denominação W2 deste arame traz diversos elementos ligados que fazem dele o arame tubular ideal para a soldagem de aços patináveis. Ambos foram comprados em carretéis de 15 kg e na bitola de 1,2 mm, critério definido conforme a facilidade de encontrar os recursos no mercado.

As especificações do arame sólido ER 80 S-G se dão conforme a tabela 7, seguindo a normativa AWS A5.28:

Tabela 7 – Composição química, especificações mecânicas e deposição do arame ER 80 S-G.

Composição química do arame (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
0,07	1,5	0,83	0,012	0,002	0,3	0,73	0,26
Propriedades mecânicas (MPa)							
Limite de escoamento		Limite de resistência à tração			Alongamento (%)		
530 MPa		620 MPa			22		
Diâmetro		Corrente		Tensão		Taxa de deposição	
1,2 mm		120-350 A		20-33 V		1,5 - 6,6 kg/h	

Fonte: O autor (2023), adaptado de Sider Weld.

Os valores apresentados acima são considerados utilizando-se o gás mistura (80% Ar + 20% CO_2) e o diâmetro de arame de 1,2 mm.

Indicado para soldas multipasses e aços patináveis (ESAB), o arame tubular E81T1-C1A2-W2 tem as especificações apresentadas na tabela 8, seguindo a normativa AWS A5.36:

Tabela 8 - Composição química, especificações mecânicas e deposição do arame E81T1-C1A2-W2

Composição química do arame (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
0,058	0,780	0,470	0,012	0,007	0,550	0,520	0,470
Propriedades mecânicas (MPa)							
Limite de escoamento		Limite de resistência à tração			Alongamento (%)		
580 MPa		650 MPa			25		
Diâmetro		Corrente		Tensão		Taxa de deposição	
1,2 mm		190 - 320 A		22 - 35 V		1,90 kg/h até 5,75 kg/h	

Fonte: O autor (2023), adaptado de Esab.

Os valores apresentados acima são considerados utilizando-se o gás mistura (80% Ar + 20% CO_2) ou 100% CO_2 e o diâmetro de arame de 1,2 mm.

Ambos os arames possuem composições muito próximas ao metal de base, a fim de manter as propriedades dos mesmos semelhantes, garantindo a resistência mecânica necessária para a junta e as propriedades anticorrosivas (PANNONI, 2004).

Para a soldagem da amostra do processo híbrido, foi utilizado junto ao laser autógeno de potência máxima de 10 kW, o arame sólido ER 80 S-G. Este arame foi utilizado devido à sua menor taxa de limpeza após o cordão e também porque o processo laser híbrido desenvolvido no SENAI já estava mais parametrizado para arames sólidos.

3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O quadro 3 apresenta os equipamentos utilizados em cada teste. As figuras 17 e 18 apresentam os equipamentos e fontes.

Alguns equipamentos complementares foram utilizados, tais como: escova de aço rotativa pneumática para limpeza de escórias, desincrustador pneumático para bater a casca do processo tubular, pirômetro Fluke 350°C, cronômetro TA396 e a serra fita Starret com refrigeração.

Quadro 3 – Equipamentos utilizados por processos

	Fonte MIG Sumig NB500	Fonte TRUMPF TruDisk 10002	Fonte MIG IMC Sold. DigiPlus A7	Integrador HLAW (LBW+GMAW) Preco
Amostra 1 (GMAW 30°)	X			
Amostra 2 (FCAW 30°)	X			
Amostra 3 (FCAW 45°)	X			
Amostra 4 (HLAW)		X	X	X

Fonte: O autor (2023)

Figura 17 – Fontes utilizadas nos procedimentos: à esquerda está a fonte Laser, centralizada está a fonte IMC e à direita está a fonte SUMIG.



Fonte: O autor (2023)

Figura 18 – Célula de soldagem híbrida do SENAI-SC

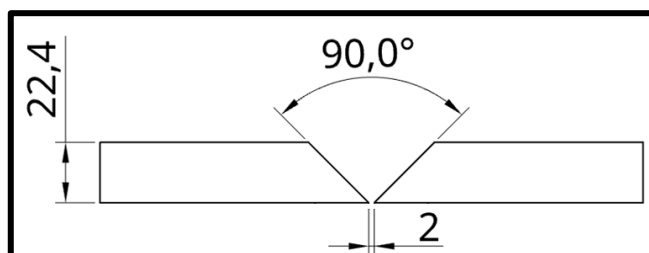


Fonte: O autor (2023)

3.4 CORPOS DE PROVA E PROJETO DA JUNTA

O projeto atual da junta é demonstrado conforme a figura 19. Visando a penetração total e melhor fusão, o projeto solicita uma fresta de 2 mm entre as chapas. Ele também solicita bisel de 45° e não solicita cobre-junta.

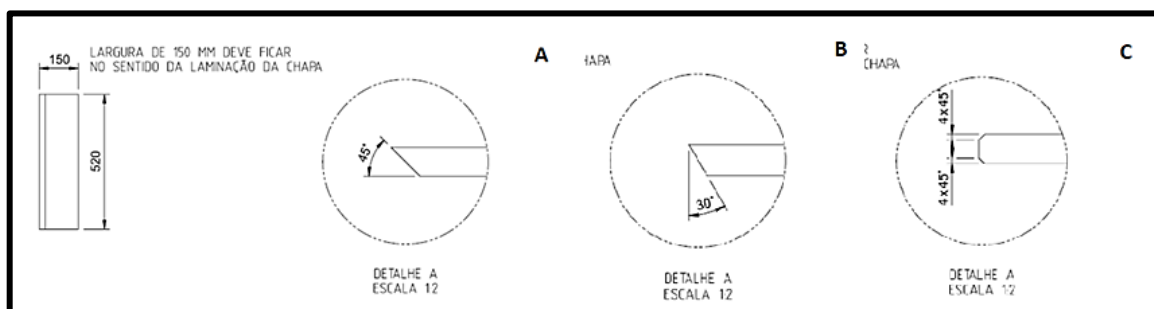
Figura 19 – Projeto de junta atual



Fonte: O autor (2023)

As amostras foram confeccionadas para comparar os impactos de uma alteração de geometria de junta, uma alteração de eletrodo e a implementação de um processo totalmente novo. Portanto, cada amostra foi elaborada para atender às particularidades do processo e as necessidades do projeto da junta, o qual solicita penetração total. A figura 20 apresenta os corpos de prova de cada processo.

Figura 20 – (A) Corpo de prova AM03 bisel V de 45°, igual ao processo atual. (B) Corpo de prova AM01 e AM02 bisel V de 30°, visando comparar alteração de geometria. (C) Corpo de prova AM04 bisel duplo V de 45° com nariz de 16 mm, utilizada para o processo híbrido.

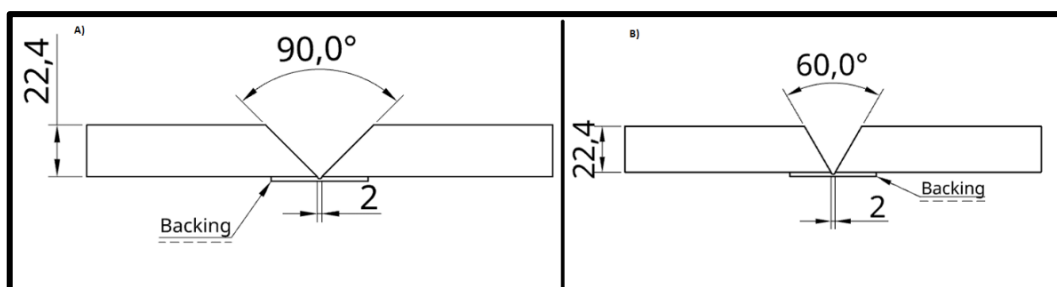


Fonte: O autor (2023)

As amostras foram confeccionadas com 150 mm de largura, tamanho suficiente para os ensaios de laboratório. Seu comprimento foi de 520 mm, respeitando o projeto original do produto.

O projeto da junta para as amostras manuais testadas foi elaborado conforme a figura 21.

Figura 21 – Projeto da junta para chanfro de 45° à esquerda e 30° à direita, ambas com cobre-junta e espaçamento de 2 mm.

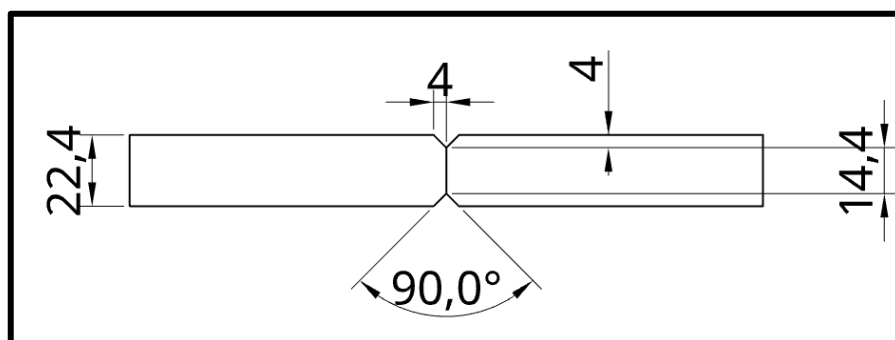


Fonte: O autor (2023)

As juntas foram pensadas para que se atenda a penetração total solicitada pelo projeto original, incluindo o cobre-junta, também conhecido por *backing*, para melhorar a penetração e obter um melhor passe de raiz.

O projeto da junta para as amostras de soldagem híbrida foi desenvolvido conforme a figura 22.

Figura 22 - Projeto da junta com bisel duplo V de 45°.



Fonte: O autor (2023)

Este projeto visa a penetração total com o equipamento de soldagem híbrida em dois passes, sendo um superior e um inferior. Devido à potência da fonte laser, não foi possível realizar o projeto da junta para atingir a penetração total em um passe único.

3.5 DESCRIÇÃO DOS TESTES

Com base em todas informações apresentadas até o momento, foram determinadas as amostras conforme o quadro 4.

Quadro 4 – Diferentes amostras executadas

Processo	Amostra	Eletrodo	Geometria	Quantidade de CP
MIG/MAG	Am01	Arame Sólido 1,2mm ER 80S-G Soldagem Manual	Chanfro 30°	9
FCAW	Am02	Arame Tubular 1,2 mm E81T1-C1A2-W2 Soldagem Manual	Chanfro 30°	9
	Am03		Chanfro 45° - Processo Atual	9
Híbrido LASER-MAG	Am04	Laser autógeno + Arame Sólido 1,2mm ER 80S-G Soldagem Mecanizada	Chanfro duplo V de 45° com nariz de 16 mm	9

Fonte: O autor (2023)

Entre as amostras AM01 e AM02, foi possível tirar conclusões sobre como os diferentes eletrodos afetaram o processo da junta. Entre as amostras AM02 e AM03, foi possível tirar conclusões sobre o que a alteração da geometria afetou o processo da junta. E a AM04 foi comparada com as demais, pois foi elaborada através de um processo mais produtivo e moderno.

3.6 PARÂMETROS DO PROCESSO

Na tabela 9, são apresentados os parâmetros gerais que foram monitorados nos processos executados.

Tabela 9 – Parâmetros gerais controlados em cada processo.

Amostra	Gás de Proteção	Vazão de Gás (l/min)	Temperatura de Pré-Aquecimento (°C)		Temperatura de Interpasse (°C)		Aporte Térmico (kJ/mm)	
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Amostra 1 (GMAW 30°)	80% Ar + 20% CO ₂	17	10	50	20	350	1	2
Amostra 2 (FCAW 30°)	80% Ar + 20% CO ₂	17	10	50	20	350	1	2
Amostra 3 (FCAW 45°)	80% Ar + 20% CO ₂	17	10	50	20	350	1	2
Amostra 4 (HLAW)	75% Ar + 25% CO ₂	15	10	50	20	350	1	2

Fonte: O autor (2023)

Optou-se por manter o mesmo gás de proteção em todos os processos testados, eliminando-se uma variável de comparação. Foram respeitados os parâmetros especificados pelas EPS (Especificações de Soldagem), que indicam um intervalo de 15 a 20 l/min. No

processo híbrido, devido às restrições de recursos, foi utilizada uma mistura diferente em relação às demais.

Nenhuma das amostras apresentou a necessidade de pré-aquecimento, todas estavam com temperatura acima de 20°C, medida através de um pirômetro, antes de se iniciar o procedimento. Ao longo do processo, foi controlada a temperatura após cada passe, sendo que nenhum passe ultrapassou os 350°C, conforme definido nos parâmetros de interpasse.

Através da orientação da equipe do Instituto de Tecnologia SENAI de Joinville, para o processo híbrido (HLAW), foram calculados os aportes térmicos do processo GMAW e LBW de forma separada e, posteriormente, somados, ficando todos dentro da faixa estipulada.

O cálculo de aporte térmico do processo Laser (LBW) é dado pela equação 3 a seguir:

$$\text{Aporte Térmico LBW}_{\text{kJ/mm}} = \frac{\text{potência do laser (W)} * 60}{\text{velocidade de solda} \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) * 1000} \quad (3)$$

Nenhum processo desrespeitou a faixa de aporte térmico estipulada nos parâmetros da tabela 9.

Os parâmetros de soldagem utilizados foram os valores obtidos nos painéis das máquinas em cada passe de soldagem. Para atingir estes parâmetros, foram realizadas diversas rodadas de testes de soldagens preliminares com chapas destrutivas, e foram efetuados cortes e macrografias para identificar se a penetração e a fusão estavam adequadas.

Os melhores parâmetros atingidos são apresentados na tabela 10, sendo os parâmetros adotados para os testes deste trabalho.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados nos testes de soldagem.

Amostra	Raiz			Demais passes			Velocidade de soldagem (mm/min)
	Tensão média de arco aberto (V)	Corrente média de arco aberto (A)	Potência laser (W)	Tensão média de arco aberto (V)	Corrente média de arco aberto (A)	Potência laser (W)	
Amostra 1 (GMAW 30°)	20,7	175	-	24,1	230	-	250
Amostra 2 (FCAW 30°)	24,7	167	-	26,3	260	-	250
Amostra 3 (FCAW 45°)	24,7	180	-	26,3	260	-	250
Amostra 4 (HLAW)	39,8	323	8000	-	-	-	800

Fonte: O autor (2023)

3.7 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

As amostras foram pesadas antes e após o procedimento de soldagem, podendo ser verificada a deposição de material em cada processo.

Foram cronometrados os tempos de arco aberto e de limpeza, bem como a temperatura após cada cordão de solda, para controlar a produtividade e a temperatura de interpasses.

Foi anotada a temperatura ambiente nos dias dos testes, por ser uma variável que poderia impactar nos resultados.

Para gerenciar todas as informações e parâmetros dos processos, foi criada uma planilha de controle para cada passe de soldagem.

3.7.1 Procedimentos GMAW e FCAW

A posição de soldagem de todas as amostras foi a plana (1G), conforme norma ASME IX QW-461.3. As amostras foram fixadas numa bancada através de dois grampos sargentos e pequenos cordões de solda, para evitar o empenamento por aporte térmico. A figura 23 evidencia a preparação das amostras para a soldagem.

Figura 23 – Preparação das amostras 1, 2 e 3 na bancada para a soldagem.



Fonte: O autor (2023)

Para todas as amostras de soldagem manuais, foram utilizadas cobre-juntas, visando garantir a qualidade do passe de raiz, com o vazamento da poça de fusão para o lado oposto do metal de base. Também foram utilizadas as técnicas de *Run On Tab* e *Run Off Tab*, representadas pela fixação de peças de sacrifício, conhecidas por “babadores”, as quais evitam falhas no início e no final de cada cordão através do seu prolongamento.

Todas as amostras de soldagem manual GMAW e FCAW foram executadas previamente, testando parâmetros, executando cortes e macrografias, antes de se executar o

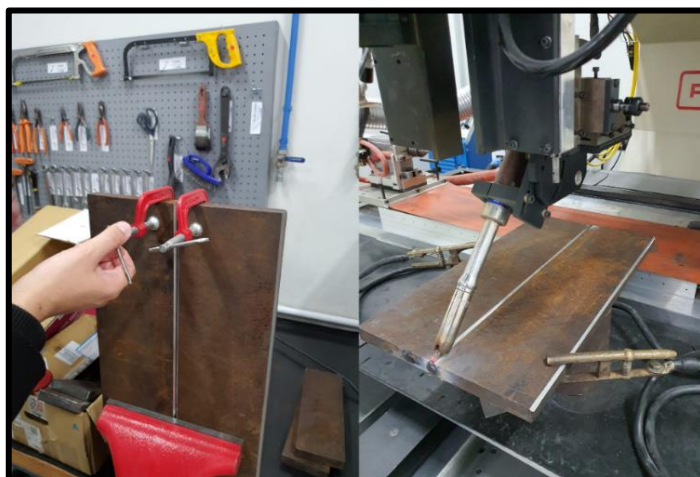
procedimento oficial. Desta forma, foi possível identificar se os parâmetros de soldagem realmente estavam atendendo às necessidades do projeto. Com a aprovação dos parâmetros, foram realizados os procedimentos oficiais.

Nestes procedimentos, foram usados dois parâmetros distintos, definidos conforme a tabela 10, sendo um parâmetro para o passe de raiz, mais conservador e controlado para evitar vazamento excessivo na raiz de solda, ocorrendo a fusão de muito material, e outro parâmetro para os demais passes, menos conservador, tendo um acréscimo de tensão e corrente que aumentou a velocidade.

3.7.2 Procedimento Híbrido HLAW (LBW+GMAW)

Foi adotada a posição de soldagem plana (1G), conforme norma ASME IX QW-461.3. As duas chapas da amostra foram unidas e ponteadas previamente, através de um equipamento de eletrodo revestido, com auxílio de morsa e grampos para o alinhamento das faces. Após, a amostra foi posicionada sobre a bancada de soldagem e foi feita a coleta dos pontos do equipamento mecanizado de soldagem. A figura 24 evidencia a preparação da amostra para a soldagem.

Figura 24 – Preparação da amostra 4 para a soldagem híbrida



Fonte: O autor (2023)

Para alcançar o melhor procedimento híbrido, foram executadas 18 variações de testes. A tabela 11 evidencia todas as combinações testadas, sendo utilizado oficialmente no procedimento do trabalho o teste de ordem 15. Foi percebida uma dificuldade maior com a parametrização do procedimento GMAW em relação ao procedimento LBW. Foi optado por manter a velocidade do processo fixa em 800 mm/min.

Tabela 11 – Variações testadas no processo híbrido

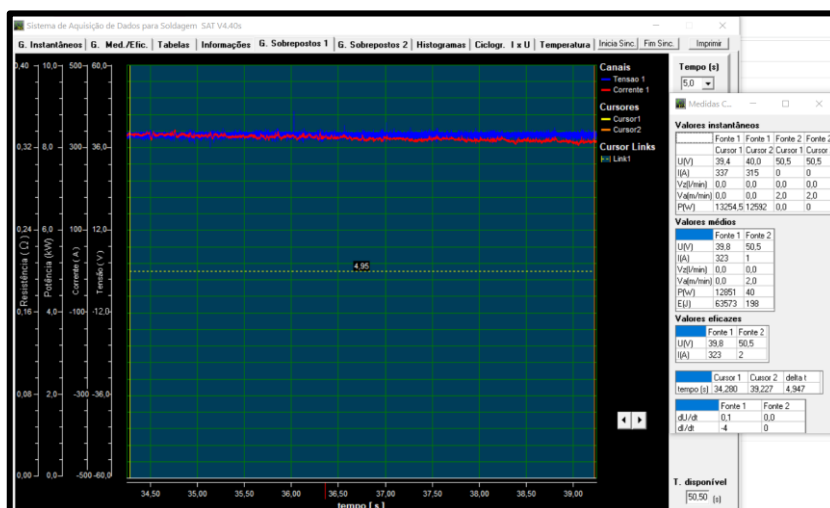
Ordem	Local	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)	Potência laser (W)	Tensão média (V)	Corrente média (A)
1	Sobrechapa	120	800	2000	19,7	132
2	Junta	120	800	2000	19,4	131
3	Junta	120	800	2000	19,3	128
4	Junta	120	800	8000	19,3	129
5	Junta	180	800	8000	22,1	188
6	Junta	220	800	8000	23,6	223
7	Junta	280	800	8000	26,1	279
8	Junta	300	800	0	35,7	312
9	Junta	280~310	800	0	25,6	270
10	Junta	330	800	0	38,2	348
11	Junta	330	800	8000	38,2	319
12	Junta	350	800	8000	39,8	298
13	Junta	350	800	8000	39,8	350
14	Junta	350	800	8000	39,7	306
15	Junta	350	800	8000	39,8	323
16	Junta	120	800	8000	19,4	126
17	Junta	180	800	8000	22,3	183
18	Junta	120	800	8000	19,5	120

Fonte: O autor (2023)

O parâmetro de ordem 18, da tabela 11, foi realizado em uma junta sem chanfro, sendo obtida a penetração próxima do total, mostrando que seria possível, com mais testes e parametrizações, eliminar também a operação de chanfro da peça.

A figura 25 apresenta os gráficos de oscilação dos parâmetros de soldagem ao longo de todo o tempo do procedimento de ordem 15.

Figura 25 – Gráfico de parâmetros médios para o processo híbrido



Fonte: O autor (2023)

Pode-se verificar como os parâmetros oscilaram muito pouco, indicando que o processo estava estabilizado.

3.8 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CPS)

Após os procedimentos de soldagem, os corpos de prova foram preparados para os ensaios de laboratório, sendo eles: tração, dobramento lateral, macrografia, micrografia e microdureza. A preparação dos corpos de prova, seus respectivos tamanhos e quantidades, foram baseados na normativa interna da empresa, que segue a norma ASME IX. Ao todo, foram confeccionados 36 corpos de prova de laboratório.

A quantidade de CPS para as amostras de cada processo é vista no quadro 5:

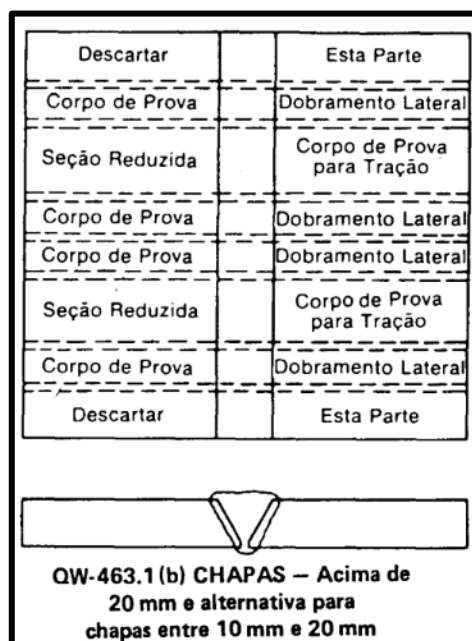
Quadro 5 – Corpos de prova para análise de laboratório de cada amostra.

Ensaio de laboratório	Ensaio de tração	2 Corpos de prova
	Ensaio de dobramento lateral	4 Corpos de prova
	Macrografia	1 Corpos de prova
	Micrografia	2 Corpo de prova
	Microdureza	

Fonte: O autor (2023)

A figura 26 ilustra como a norma ASME IX QW-463.1 solicita que se removam os CPS da amostra soldada para uma chapa acima de 20 mm.

Figura 26 – Critério para retirada dos corpos de prova.



Fonte: ASME IX (2023)

Com base neste critério e acrescentados os CPs de metalografia, ficaram definidas as regiões dos quais os nove corpos de prova foram retirados. A figura 27 ilustra o critério utilizado e evidencia o corte.

Figura 27 – Região da amostra de onde os corpos de prova foram retirados (à esquerda). À direita, aparece o procedimento de corte com serra fita refrigerada.



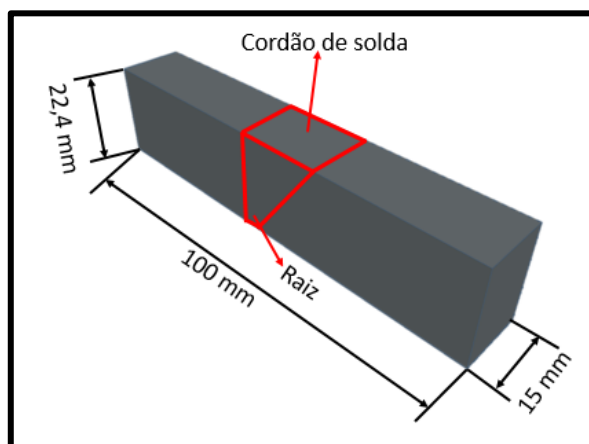
Fonte: O autor (2023)

Todas as amostras foram submetidas a cortes em serra fita com refrigeração, tomando-se o cuidado de não aplicar calor ao processo, pois ele poderia alterar alguma característica que inviabilizaria os testes.

Foi necessária a usinagem para planificar os corpos de prova de tração e dobramento lateral, devido ao empenamento das amostras em consequência do aporte térmico do procedimento de soldagem. Toda a usinagem foi realizada a frio, evitando assim, qualquer alteração nas características ocasionadas pelo calor. Entre as quatro amostras, a que mais empenou foi a amostra 3. A espessura mínima possível para planificação das amostras foi de 17 mm. Além disso, com espessuras maiores, haveriam restrições quanto ao encaixe no equipamento de tração.

Para as amostras de macrografia, micrografia e microdureza, foram preparados três corpos de prova, um para cada ensaio. Estas amostras foram mantidas na espessura original, sem usinagem, para a análise ser realizada nas regiões de raiz e reforço da solda. As amostras de metalografia foram preparadas no tamanho mostrado na figura 28.

Figura 28 – Amostras de metalografia



Fonte: O autor (2023)

Os corpos de prova preparados para os ensaios são apresentados na figura 29, cada conjunto da figura é repetido para cada amostra.

Figura 29 – Conjunto de CPS finalizados para ensaios de cada uma das quatro amostras.



Fonte: O autor (2023)

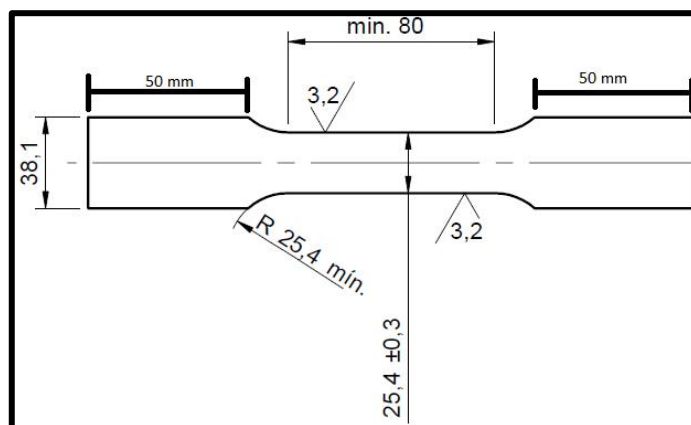
3.9 ENSAIOS DE QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Para avaliação do desempenho mecânico das juntas soldadas, foram realizados os ensaios destrutivos descritos na sequência.

3.9.1 Ensaio de Tração

Para os ensaios de tração, foram preparados dois CPS para cada amostra de soldagem, atendendo aos critérios da norma ASME IX QW-150. Os mesmos foram usinados conforme os requisitos apresentados na figura 30 e com espessura de 17 mm.

Figura 30 – Projeto do CP de tração



Fonte: O autor (2023)

De acordo com as seções QW-152 e 153 da norma ASME IX, os corpos de prova para os ensaios de tração devem ser rompidos sob carga de tração axial.

Para que o ensaio seja aprovado, é necessário que o corpo de prova tenha uma resistência à tração não menor do que:

- a) o limite mínimo especificado para o metal de base;
- b) o limite mínimo de resistência à tração especificada pelo metal de solda, no caso em que for permitida pela seção do código, a utilização de um metal de solda com resistência a tração inferior à do metal de base, na temperatura ambiente;
- c) se o corpo de prova romper no metal de base, externamente à solda ou a linha de fusão, o teste deve ser aprovado, desde que a resistência determinada tenha um valor mínimo igual ou superior a 95% da resistência à tração especificada pelo metal de base (ASME IX, 1984).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Qualidade da Randon Implementos. A máquina utilizada para os ensaios está ilustrada na figura 31, modelo Wolpert da marca Panantec. Neste ensaio, os corpos de prova foram submetidos a esforços de tração axial até se alongarem e romperem, sendo possível verificar seus limites de escoamento e tração, possíveis falhas na soldagem e alongamento de todas as amostras.

Figura 31 – Máquina de ensaios de tração e dobramento universal realizando ensaio da amostra 1 do processo GMAW.



Fonte: O autor (2023)

3.9.2 Dobramento Lateral

Para os ensaios de dobramento, conforme norma, devido à espessura das amostras, foi realizado o procedimento de dobramento lateral. Foram preparados quatro CPS para cada amostra de soldagem, atendendo aos critérios da norma ASME IX QW-160.

O procedimento de dobramento lateral indica que seja cortada uma porção de 10 mm de espessura da amostra para executar o dobramento lateralmente. Poderia ser mantida a mesma espessura da peça original, mas, devido ao empenamento, foi reduzida para 17 mm.

No procedimento de dobramento lateral, a solda é transversal ao eixo longitudinal do corpo de prova, de forma que uma das suas superfícies laterais se torna a superfície convexa do corpo de prova dobrado. Sendo possível, neste teste, verificar falhas em qualquer etapa da soldagem, podendo o CP romper ou falhar em qualquer região da soldagem.

Ainda, conforme ASME IX QW-462.1, a figura 32 ilustra o corpo de prova para dobramento lateral.

Figura 32 - Projeto do CP de dobramento lateral

T, mm	Y, mm	w, mm	
		P-Nº 23, F-Nº 23, ou P-Nº 35	Todos os outros metais
10 a 40, incl.	T	3	10
> 40	Nota 1	3	10

Fonte: ASME IX (2023)

Conforme a figura 32, para amostras entre 10 e 40 mm de espessura, a altura “Y” do CP pode ser a própria espessura do metal de base. O “W” é a espessura do CP, que é igual a 10 mm, com comprimento mínimo de 150 mm.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Qualidade da Randon Implementos. A máquina utilizada para os ensaios foi a mesma ilustrada na figura 31.

De acordo com as seções QW-162 e 163 da Norma ASME IX, a lateral do corpo de prova, voltado em direção à abertura do dispositivo de testes, deve ser a lateral com os maiores defeitos, se existirem, para os dobramentos das laterais.

Para que o ensaio seja aprovado, deve apresentar as seguintes condições:

a) no teste de dobramento transversal, a solda e a ZTA devem estar completamente contidas na parte dobrada do corpo de prova;

b) os corpos de prova não devem apresentar defeitos visíveis na solda ou ZTA maiores que 3 mm, medidos em qualquer direção, na superfície convexa do corpo de prova. As trincas nos cantos dos corpos de prova dobrados não devem ser consideradas, exceto quando constituem evidência clara de que resultam de inclusões de escórias ou de outros defeitos internos das juntas;

c) os corpos de prova que possuem metal de base revestido com metal de solda resistente à corrosão não devem apresentar defeitos visíveis no revestimento maiores que 1,5 mm, medidos em qualquer direção, ou maiores que 3 mm, em qualquer trecho da interface. (ASME IX, 1984).

3.10 ENSAIOS DE METALOGRAFIA

Para avaliação do desempenho metalúrgico das juntas soldadas, foram realizados os seguintes ensaios não destrutivos:

3.10.1 Macrografia

Conforme a norma ASME IX QW-183, uma das faces de cada seção transversal deve ser polida e atacada com reagente químico adequado, para se obter uma nítida diferenciação entre o metal de adição e a ZTA, podendo assim, avaliar a fusão entre o MB e o MS, a interface entre os dois, o tamanho da ZTA e descontinuidades, como trincas e até inclusões.

Para aprovação é necessário que a solda e a ZTA apresentem fusão completa e estejam isentas de trincas visíveis.

Para a realização dos ensaios macrográficos, uma das faces do corpo de prova foi lixada com lixas à base d' água e polida com alumina. Após, foi atacada com reagente químico nital 10%, adequado para obter-se a diferenciação entre as zonas de soldagem.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Qualidade da Randon Implementos. A verificação das penetrações e diferenciações das zonas, bem como as larguras e gargantas de cordões, foi realizada com auxílio do software AutoCad, pois, devido ao tamanho dos cordões, o equipamento do laboratório não possibilitou as análises.

3.10.2 Micrografia

Este ensaio consiste na análise das alterações de microestruturas e cristais do aço com o auxílio do microscópio, posterior ao procedimento de soldagem, permitindo observar a granulação do material, a forma e verificação de inclusões, trincas, poros e descontinuidades.

Os ensaios de micrografia foram realizados no LAMEC, Laboratório de Ensaios Mecânicos da UCS. Foram realizados com o microscópio modelo Zeiss Observer.D1m, conforme figura 33.

Figura 33 - Microscópio óptico utilizado nos ensaios.



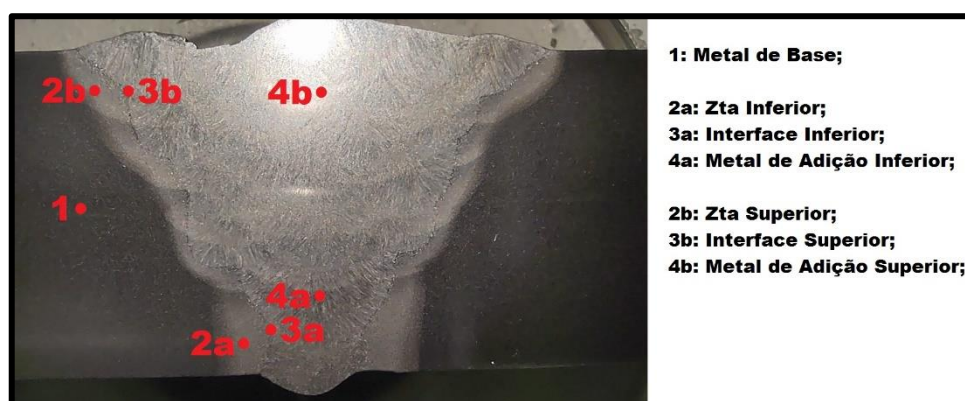
Fonte: O autor (2023)

Para a realização dos ensaios micrográficos, as faces do CP foram lixadas, polidas com pasta diamantada e atacadas com reagente químico nital 2% por três segundos, para se obter a diferenciação entre as zonas do procedimento de soldagem.

As avaliações micrográficas foram realizadas em dois níveis, sendo eles: reforço da solda e raiz da solda. Dentro destas regiões, foram analisadas diferentes zonas, sendo elas: metal de base, ZTA, interface ZTA/ZF e zona fundida. A figura 34 exemplifica o método.

Nas análises de micrografia, foi acrescentada uma quinta amostra, que é o próprio metal de base sem procedimento de soldagem, para comparar todas as amostras com a microestrutura do metal sem haver alteração por qualquer procedimento térmico.

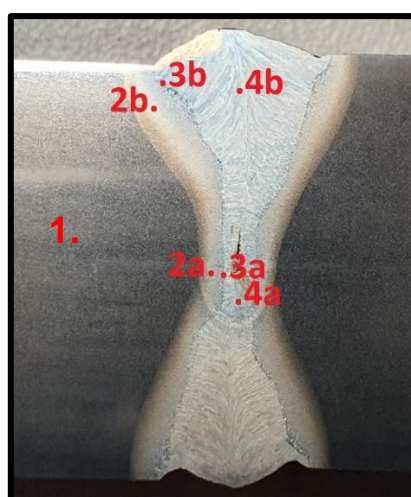
Figura 34 – Pontos de análise da microestrutura para as amostras 1, 2 e 3.



Fonte: O autor (2023)

Para a amostra 4, as zonas de avaliação foram diferentes, devido à presença de cordões de solda de ambos os lados da peça. Com isto, a região da raiz da solda passou a ser no centro da peça. A figura 35 exemplifica o método para esta amostra.

Figura 35 - Pontos de análise da microestrutura para a amostra 4.



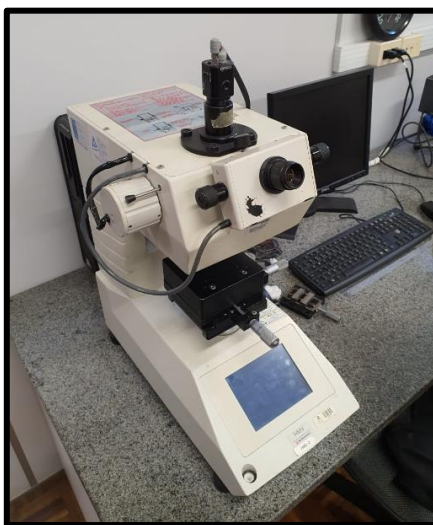
Fonte: O autor (2023)

3.10.3 Microdureza

A propriedade mecânica dureza é a resistência à penetração ou deformação permanente da superfície do material, muito utilizada na especificação de materiais e nas suas comparações. O ensaio de microdureza Vickers funciona através da aplicação de carga de um penetrador de diamante em formato quadrado, realizando medições de penetração no aço. A marca deixada por este ensaio somente é visível por microscópios. O ensaio de microdureza é necessário para compreender a interferência dos efeitos térmicos de um procedimento de soldagem no material de base após sua realização.

Os ensaios de microdureza foram realizados no LAMEC, Laboratório de Ensaios Mecânicos da UCS. Foram realizados com o microdurômetro modelo Shimadzu HMV-2, conforme figura 36.

Figura 36 - Microscópio óptico utilizado nos ensaios.

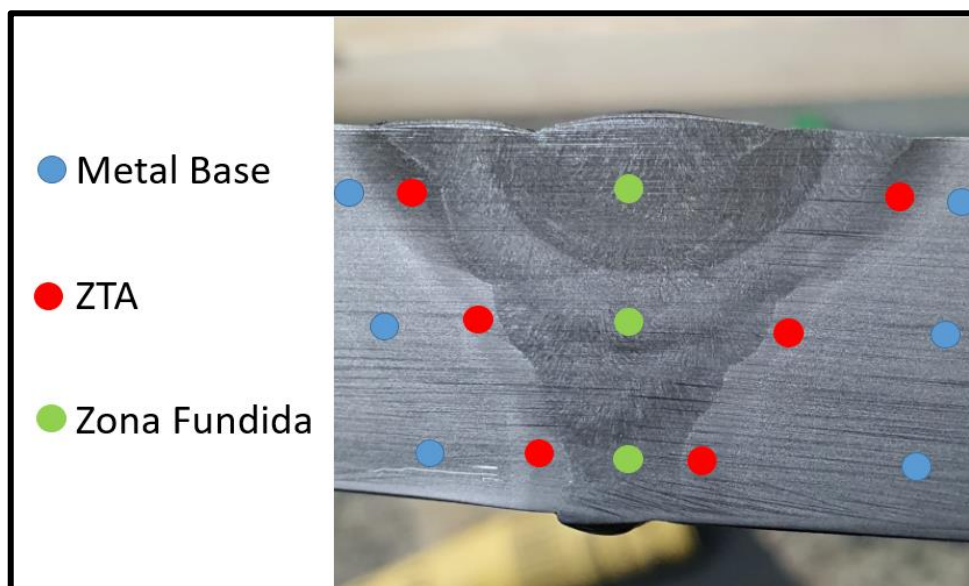


Fonte: O autor (2023)

Cada CP foi submetido a medições de microdureza Vickers em três níveis, sendo eles: reforço da solda, região mediana e raiz da solda. Dentro destas regiões, foi percorrida toda a superfície realizando-se penetrações, iniciando pelo metal de base de um lado do cordão e finalizando no metal de base do outro lado do cordão. Foram coletados três pontos em cada zona, variando entre as três regiões, totalizando 15 pontos para cada amostra. A carga utilizada foi de 0,5 kg. A figura 37 demonstra o procedimento.

Nas análises de microdureza, foi acrescentada uma quinta amostra, que é o metal de base sem procedimento de soldagem, para comparar todas as amostras com a microestrutura do metal sem alteração nenhuma por qualquer procedimento térmico.

Figura 37 – Pontos para medição de microdureza.



Fonte: O autor (2023)

3.11 MEDIÇÃO DE EMPENAMENTO

Após os procedimentos de soldagem, para medição do empenamento das amostras foi utilizado o recurso do software AutoCad. Foi comparada a medida de largura da amostra, que é 300 mm, com a largura apresentada no software, vista na figura 38 (54 mm). Foi realizada uma calibração da imagem através de uma escala, chegando-se à escala de 5,5:1 em relação às medidas reais e do software. Portanto, todos os empenamentos medidos no software, conforme visto na figura 38 (cotas traçadas da peça até a linha vermelha), foram multiplicados por 5,5.

Figura 38 - Comparativo de empenamento das amostras.



Fonte: O autor (2023)

4 RESULTADOS

Neste capítulo, através das variáveis e parâmetros controlados, foram apresentados todos os resultados obtidos no trabalho durante o monitoramento dos procedimentos de soldagem e nos ensaios de laboratório. Com os resultados consolidados, foram comparados os processos através de planilhas e gráficos.

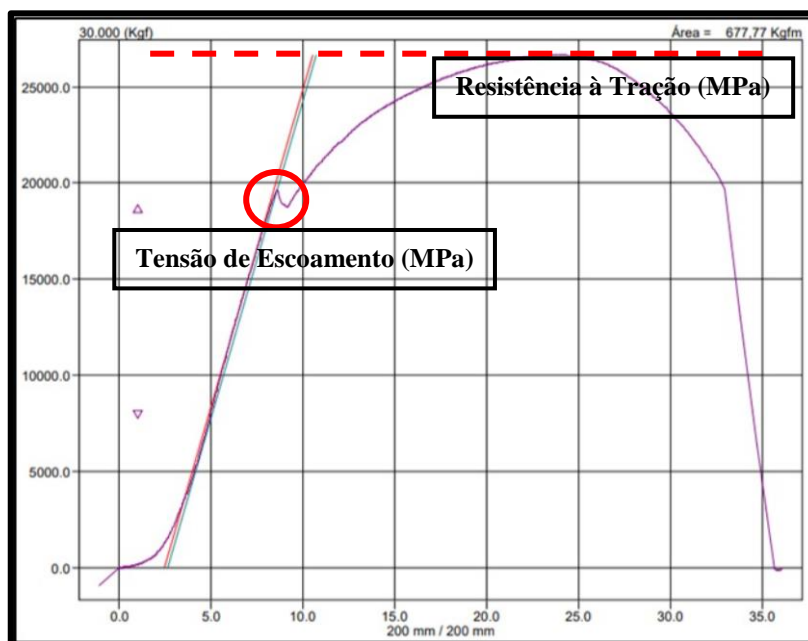
4.1 ENSAIOS DE QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Nesta seção, foram apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração e dobramento lateral realizados na Randon Implementos, que foram necessários para a avaliação do desempenho mecânico das juntas soldadas.

4.1.1 Ensaio de Tração

Esta seção apresentou os resultados obtidos nos ensaios de tração. Os valores foram divididos em três variáveis: resistência à tração, limite de escoamento e alongamento. Os três valores foram obtidos nos ensaios de tração através das curvas geradas para cada uma das condições testadas. A Figura 39 ilustra um gráfico padrão obtido nos ensaios de tração.

Figura 39 - Curva obtida no ensaio de tração de cada uma das amostras.



Fonte: O autor (2023)

A tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de tração para as quatro amostras soldadas e quais delas apresentaram falhas e foram reprovadas.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração das quatro amostras.

Amostra	CP	Resultado do ensaio	Limite de escoamento (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)	OBS
Amostra 1 (GMAW 30°)	CP 1	APROVADO	437,91	600,17	25,21	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 2	APROVADO	405,53	585,46	23,4	Não apresentou trincas ou fissuras
Amostra 2 (FCAW 30°)	CP 1	APROVADO	441,03	598,21	23,48	Não apresentou trincas ou fissuras, mas apresentou inclusões
	CP 2	APROVADO	403,45	596,24	22,8	Não apresentou trincas ou fissuras, mas apresentou inclusões
Amostra 3 (FCAW 45°)	CP 1	APROVADO	431,43	607,03	20,2	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 2	APROVADO	434,68	608,99	19,41	Não apresentou trincas ou fissuras, mas apresentou pequena falta de fusão na interface
Amostra 4 (HLAW)	CP 1	REPROVADO	413,18	584,48	26,67	Apresentou trinca na raiz da solda de 3 x 0,71 mm
	CP 2	APROVADO	419,88	593,3	26,1	Não apresentou trincas ou fissuras

Fonte: O autor (2023)

Com base nos valores obtidos na tabela 12, foi realizada uma análise estatística do processo pelo método de análise de variância, podendo ser verificada nas tabelas 17 e 18 do apêndice C. O resultado obtido neste teste mostrou que o valor de prova entre as amostras foi maior que o erro de 5%. Portanto, estatisticamente, as amostras foram iguais nos ensaios de tração realizados. O resultado do teste ANOVA reforça as hipóteses de que a amostra 4 apresentou trinca por problemas nos parâmetros dos processos ou da limitação do equipamento e não da técnica.

Na figura 40, é possível ver que todas as amostras romperam no metal de base. Suas resistências de tração apresentaram valores próximos, mas todos acima do especificado pelo metal de base, que é 582 MPa. As amostras 1, 2 e 3 foram aprovadas. A amostra 4 foi reprovada, pois um dos corpos de prova apresentou uma pequena trinca no cordão de solda, mesmo rompendo no metal de base. O outro corpo de prova da amostra 4 foi aprovado normalmente.

Os valores obtidos de escoamento, tração e alongamento foram muito próximos para todas as amostras. O perfil do rompimento também foi semelhante em todas as amostras.

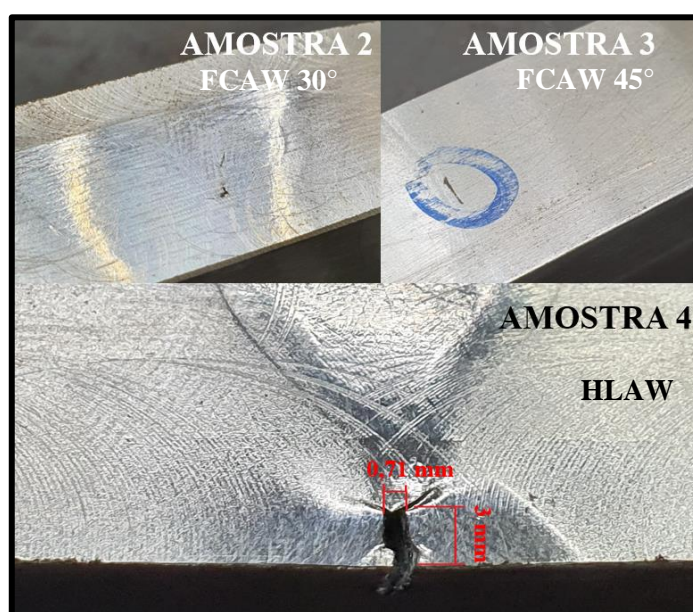
Figura 40 – Amostras rompidas após ensaio de tração.



Fonte: O autor (2023)

A figura 41 evidencia pequenas falhas encontradas em algumas amostras soldadas, sendo elas: inclusão na amostra 2, uma falha de fusão na amostra 3 e uma trinca na raiz da solda na amostra 4.

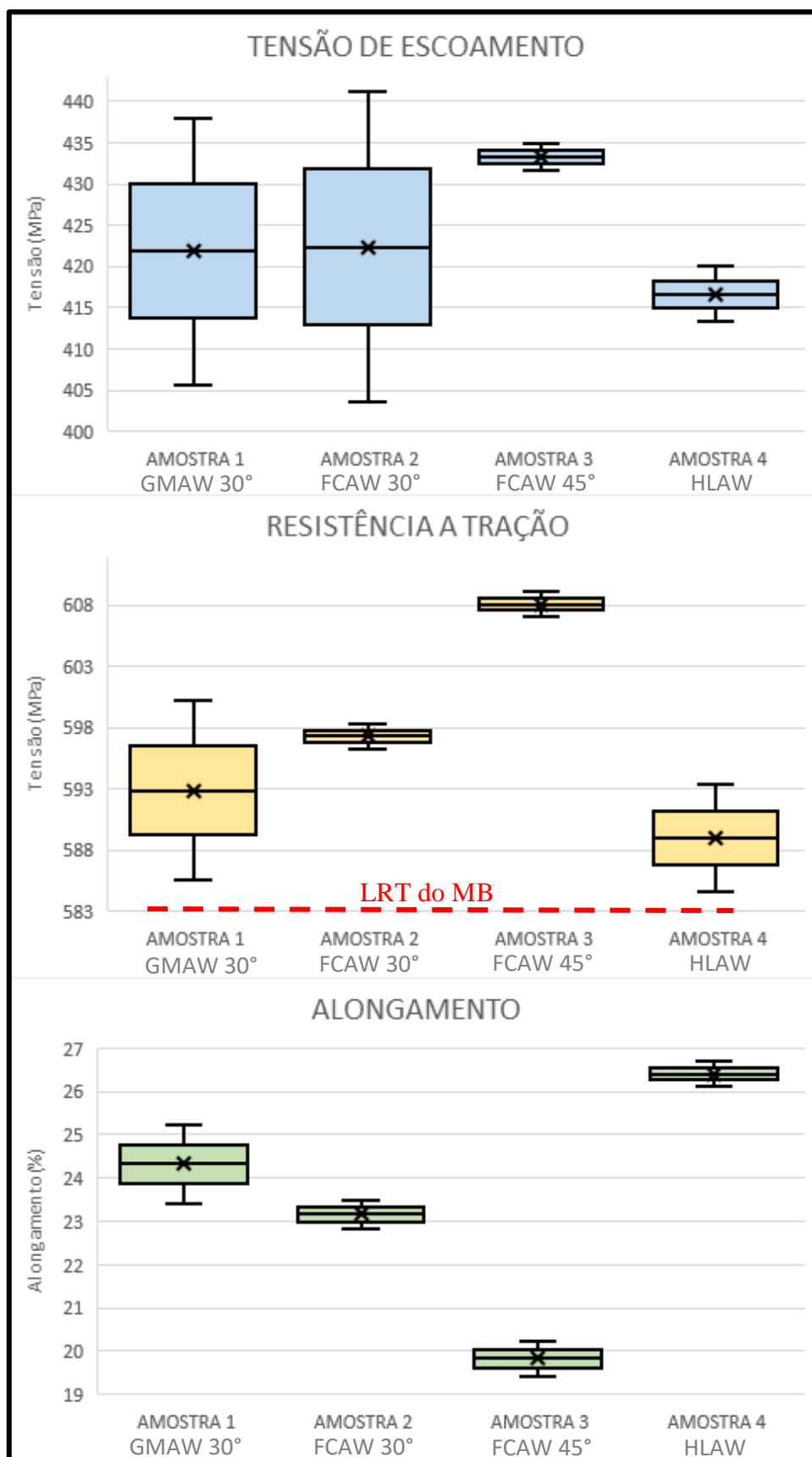
Figura 41 – Falhas evidenciadas pelos ensaios de tração.



Fonte: O autor (2023)

A figura 42 mostra os gráficos de dispersão para as tensões de escoamento, resistência à tração e alongamento de todos os CPS, comparando todas as amostras.

Figura 42 – Dispersão de dados para a tensão de escoamento, resistência a tração e alongamento.



Fonte: O autor (2023)

Na figura 42, nos limites de escoamento, foi constatado que as amostras 1 e 2 apresentaram variação em relação aos dois corpos de prova testados. As amostras 3 e 4 tiveram uma variação menor. Na resistência à tração, as amostras 1 e 4 apresentaram variações entre seus CPS. Nas amostras 2 e 3, a variação entre os CPS foi mínima, sendo a amostra 3 com maior resistência à tração. Todas as amostras apresentadas ficaram acima de 582 MPa (limite de resistência à tração do metal de base), sendo esse o valor mínimo para aprovação. Quanto ao alongamento, todas as amostras apresentaram pouca variação em relação aos seus CPS, sendo que a amostra 4 foi a que sofreu maior alongamento e a amostra 3 a que sofreu menor alongamento. Como todas as amostras romperam no metal de base, não foi possível estimar o eletrodo com maior ductilidade.

4.1.2 Dobramento Lateral

O quadro 6 apresenta os resultados dos ensaios de dobramento lateral para as quatro amostras soldadas.

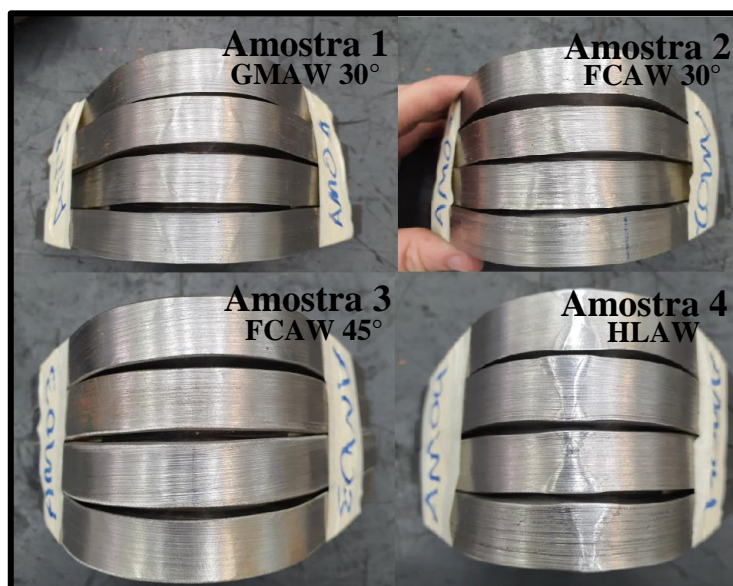
Quadro 6 – Resultado dos ensaios de dobramento lateral para as quatro amostras.

Amostra	CP	Resultado do ensaio	Observação
Amostra 1 (GMAW 30°)	CP 1	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 2	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 3	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 4	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
Amostra 2 (FCAW 30°)	CP 1	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras, mas apresentou inclusões
	CP 2	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras, mas apresentou inclusões
	CP 3	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras, mas apresentou inclusões
	CP 4	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras, mas apresentou inclusões
Amostra 3 (FCAW 45°)	CP 1	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 2	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 3	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 4	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
Amostra 4 (HLAW)	CP 1	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 2	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras
	CP 3	APROVADO	Apresentou uma trinca de 1,039 mm
	CP 4	APROVADO	Não apresentou trincas ou fissuras

Fonte: O autor (2023)

Na figura 43, é possível ver que nenhum dos 16 corpos de prova falharam no ensaio.

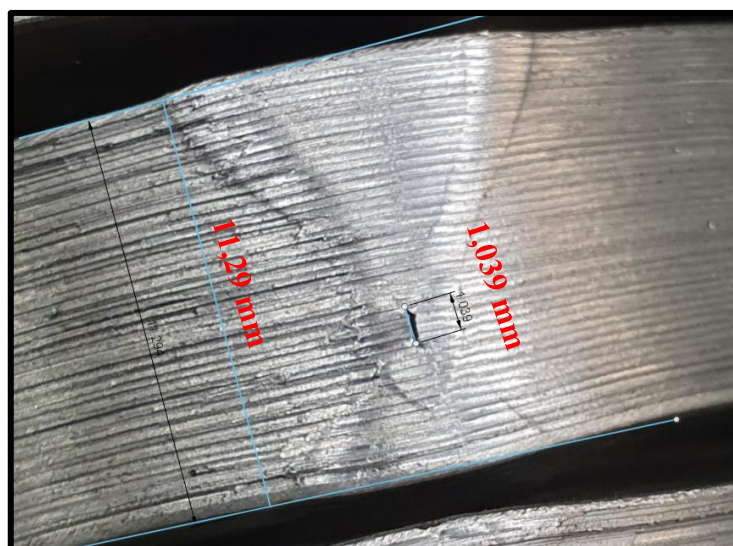
Figura 43 – Amostras de dobramento lateral.



Fonte: O autor (2023)

A figura 44 evidencia a trinca de 1,039 mm no CP 3 da amostra 4. Esta falha não é o suficiente para constatar uma reprovação do processo, uma vez que ela é menor que 3 mm.

Figura 44 – Trinca evidenciada no CP 3 da amostra 4



Fonte: O autor (2023)

4.2 ENSAIOS DE METALOGRAFIA

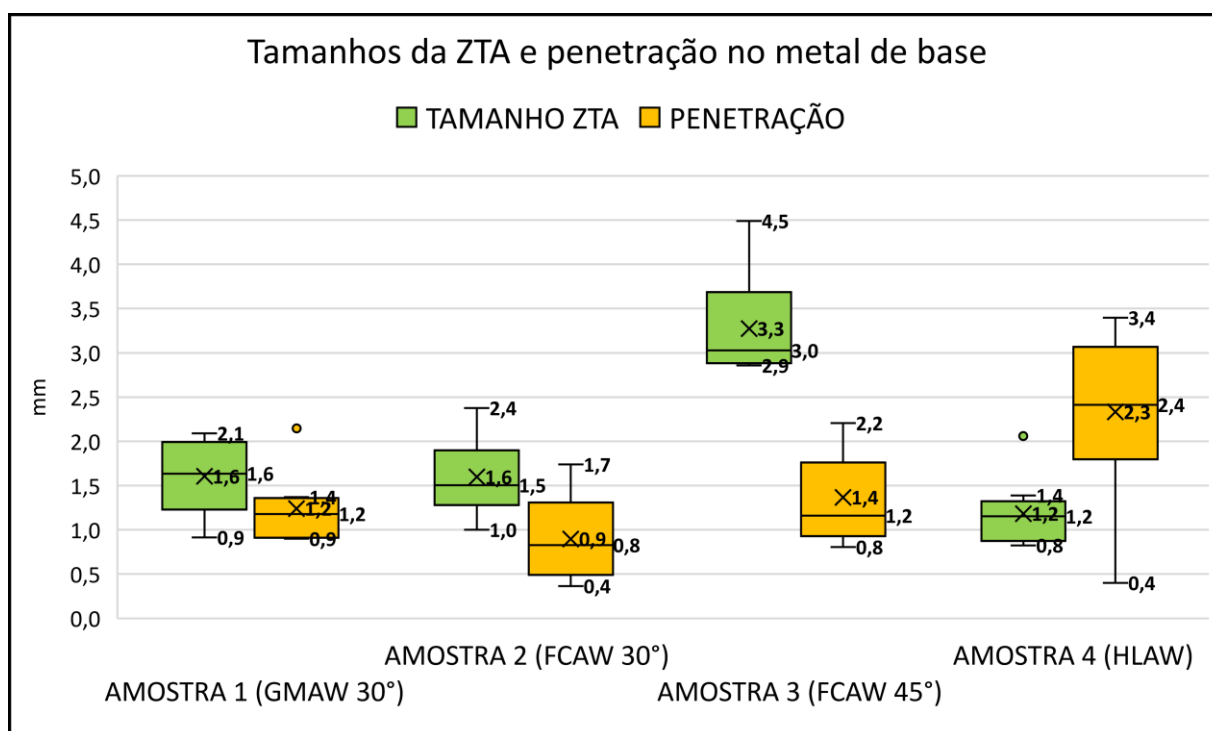
Nesta seção, foram apresentados os resultados obtidos nos ensaios de metalografia realizados na Randon e no LAMEC.

4.2.1 Macrografia

Os dados completos deste ensaio podem ser visualizados na tabela 15 do apêndice A. Nos dados obtidos, destacou-se que a amostra 3, realizada com o maior número de passes, também obteve a maior ZTA. As amostras 1 e 2 apresentam resultados próximos, devido à sua geometria ser semelhante. A amostra 4, com o menor número de passes, apresentou a ZTA média menor entre todas as amostras.

Foi percebido que a amostra 4 apresentou a maior penetração entre todas as amostras, seguida pela amostra 1, de arame sólido e, em último lugar, as duas amostras soldadas em tubular. A figura 45 apresenta a comparação entre as quatro amostras com relação à penetração e ZTA.

Figura 45 – Gráfico comparativo entre penetração e ZTA entre as quatro amostras.

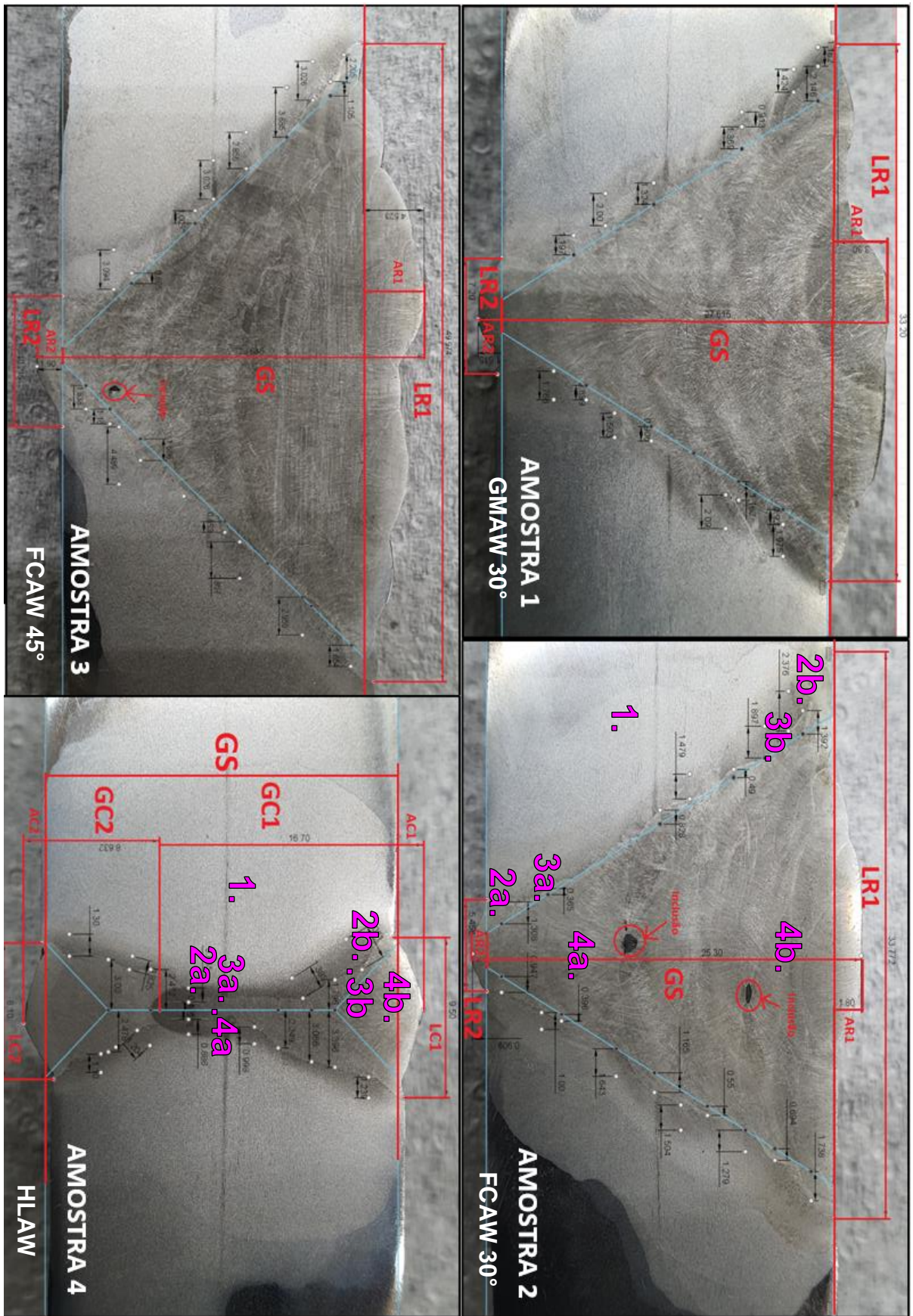


Fonte: O autor (2023)

A figura 46 apresenta a macrografia das quatro amostras lado a lado para comparação. Foram coletadas cinco medidas principais: largura do reforço, garganta de solda, altura do reforço de solda, altura da raiz e largura da raiz. Também foram coletadas as médias de penetração e do tamanho da ZTA em alguns pontos.

Na amostra 4, foram coletadas as penetrações dos dois cordões de soldagem, sendo que a penetração atingida no segundo cordão, que se sobrepôs ao primeiro, foi de 14,8 mm. As amostras 2 e 3 apresentaram inclusões de escória de arame tubular.

Figura 46 – Macrografia das 4 amostras.



Fonte: O autor (2023)

4.2.2 Micrografia

Os resultados de micrografia são apresentados nesta seção. As designações de microestrutura foram realizadas seguindo a padronização da IIW, *International Institute of Welding*, a mais utilizada para soldagem.

A tabela 13 traz dados estimados correspondentes às análises micrográficas e de microdureza, sendo eles: dados de transformação de fase do MB, tempo de resfriamento para cada amostra soldada, estimativa de dureza máxima na ZTA e estimativa de volume de martensita presente. Estes dados foram viabilizados através de calculadoras on-line da Sociedade Japonesa de Engenharia de Soldagem.

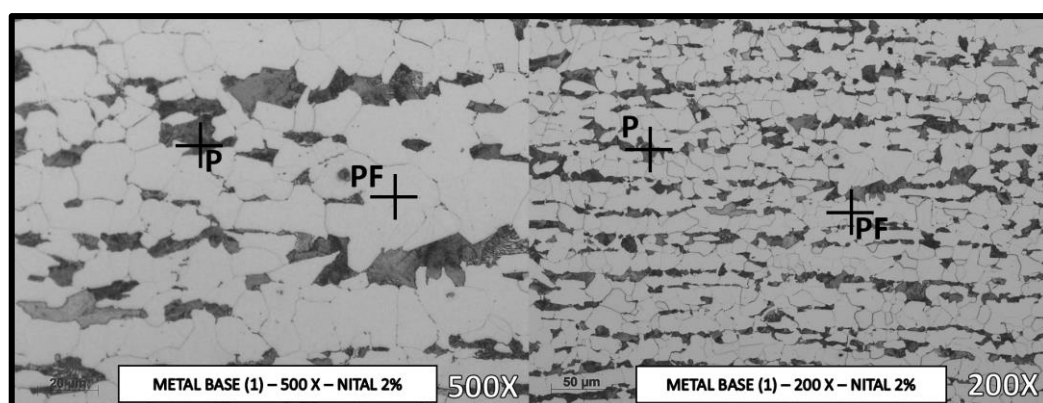
Tabela 13 – Dados de transformação de fase, tempo de resfriamento, estimativa de dureza na ZTA e volume de martensita para cada amostra.

AMOSTRAS	Condição de saída da soldagem			Temperatura de transformação de fase do MB (°C)	
	Tempo de resfriamento da soldagem, t8/5 (s)	Estimativa de dureza máxima na ZTA (Hv-5)	Volume de martensita (%)	Ac3	Ac1
AMOSTRA 1 (GMAW 30°)	7,305	324,7	52,8	917,5	
AMOSTRA 2 (FCAW 30°)	7,542	322,1	51,5		751,5
AMOSTRA 3 (FCAW 45°)	7,542	322,1	51,5		
AMOSTRA 4 (HLAW)	4,352	363,9	72,6		408,6

Fonte: O autor (2023), adaptado de Sociedade Japonesa de Engenharia de Soldagem.

Para o metal de base, todas as 5 amostras apresentaram microestrutura conforme a figura 47, sendo composta, em sua grande parte, por ferrita primária (PF) e com alguns traços de perlita (P).

Figura 47 – Micrografia do metal de base (1) para as 5 amostras.



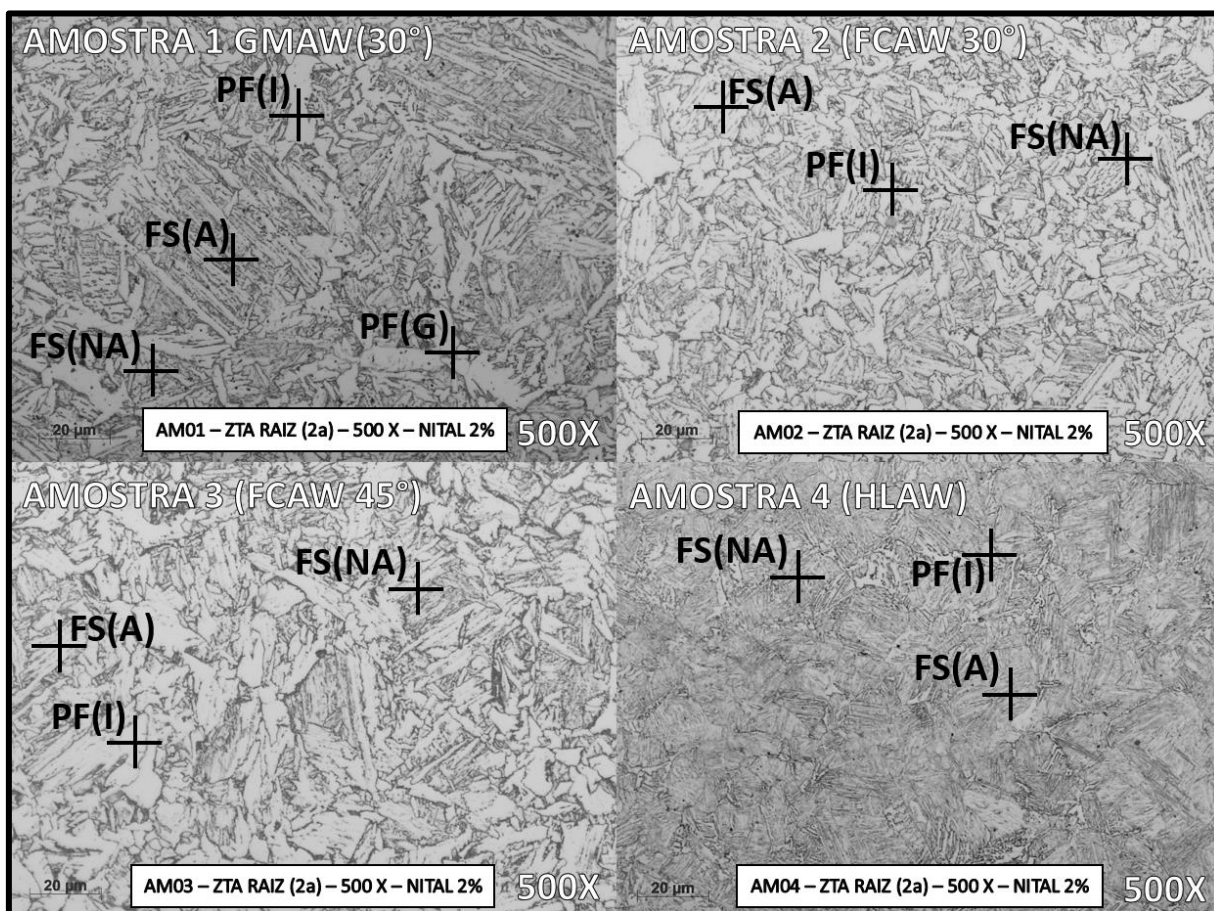
Fonte: O autor (2023)

A figura 48 apresenta as micrografias das ZTA na região da raiz da solda para as quatro amostras soldadas. As microestruturas das amostras 1, 2 e 3 foram próximas, devido à semelhança das características dos processos de soldagem, das geometrias das juntas e, conseqüentemente, do calor aplicado à junta ao longo do processo. As três amostras apresentaram designações de fases como: ferrita primária poligonal intragranular PF(I), ferrita de segunda fase não alinhada FS(NA), alinhada FS(A) e alguns traços de ferrita primária de contorno de grão PF(G).

A amostra 4 apresentou as mesmas designações, porém com grãos mais finos e menores que as outras, devido à temperatura atingida neste processo ser mais baixa em relação às demais, além de seu tempo de resfriamento ter sido menor, conforme a tabela 13.

Além disto, na zona 2a, a amostra 4 sofreu impacto maior do processo Laser e menor do processo GMAW, devido à penetração profunda do Laser, porém com a temperatura mais baixa, apresentando este refino maior do grão.

Figura 48 – Micrografia da ZTA na raiz da junta (2a) para as quatro amostras.



Fonte: O autor (2023)

A figura 49 apresenta as micrografias da ZTA na região do reforço da solda para as quatro amostras soldadas. As microestruturas para esta zona (2b) se aproximaram da zona 2a. Todas as amostras apresentaram microestruturas de FS(NA), FS(A), PF(I) e indícios de PF(G).

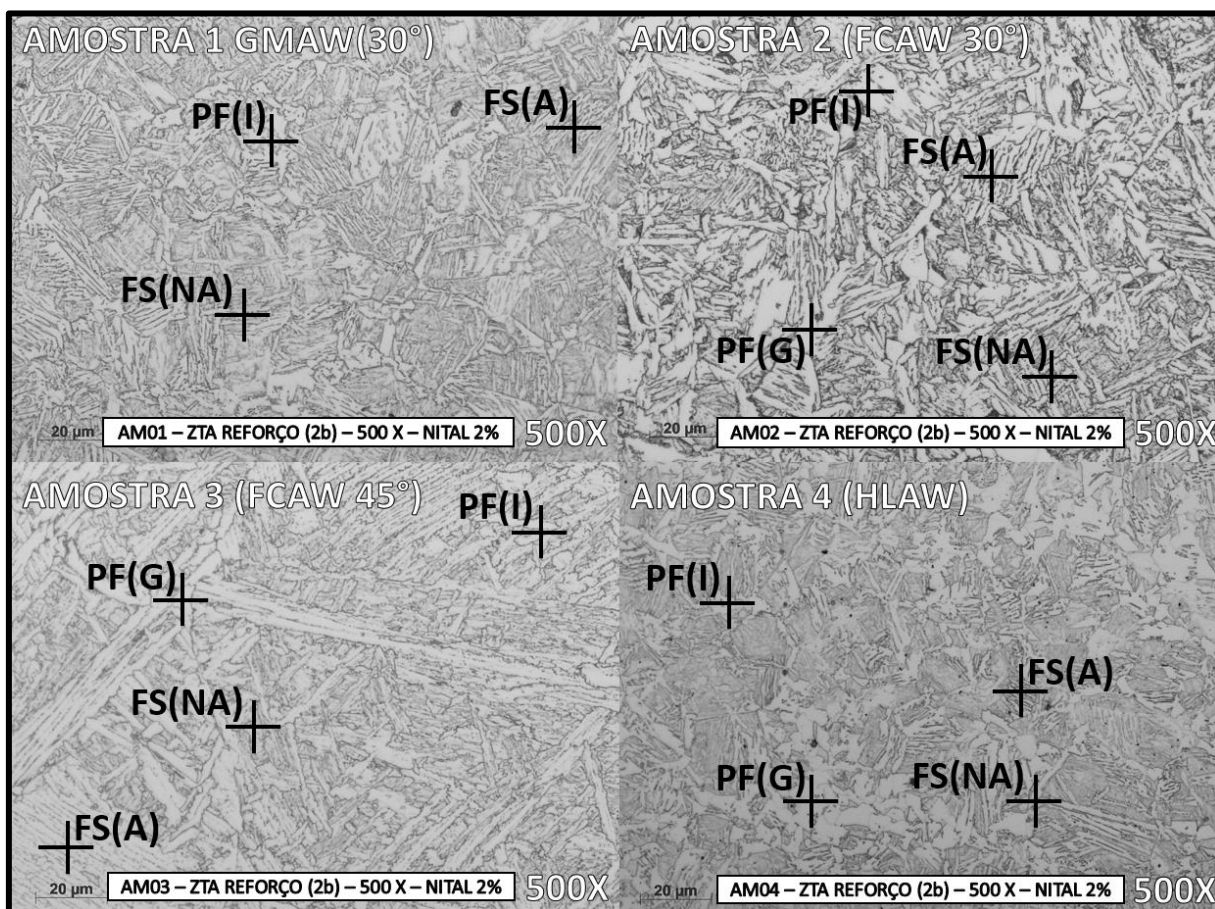
As amostras 2 e 3 se assemelharam bastante em tamanho e refino de grão, e as amostras 1 e 4 apresentam grãos mais refinados e levemente menores do que as amostras 2 e 3.

Nesta zona, na região do reforço da solda, a amostra 4 apresentou características de grãos mais próximas às demais amostras, pois, nesta zona, ela sofreu influência maior dos parâmetros de soldagem GMAW que sucederam o Laser.

Pela diferença de calor aplicado entre as regiões da raiz da solda e do reforço da solda, se esperava diferenças maiores nas microestruturas entre estas zonas, que não se concretizaram.

Os pontos pretos com formato circular, presentes em todas as amostras, aparentaram ser falhas na limpeza após o ataque com reagente químico, ou então micro poros, que não são prejudiciais à junta soldada.

Figura 49 – Micrografia da ZTA no reforço da junta (2b) para as quatro amostras.



Fonte: O autor (2023)

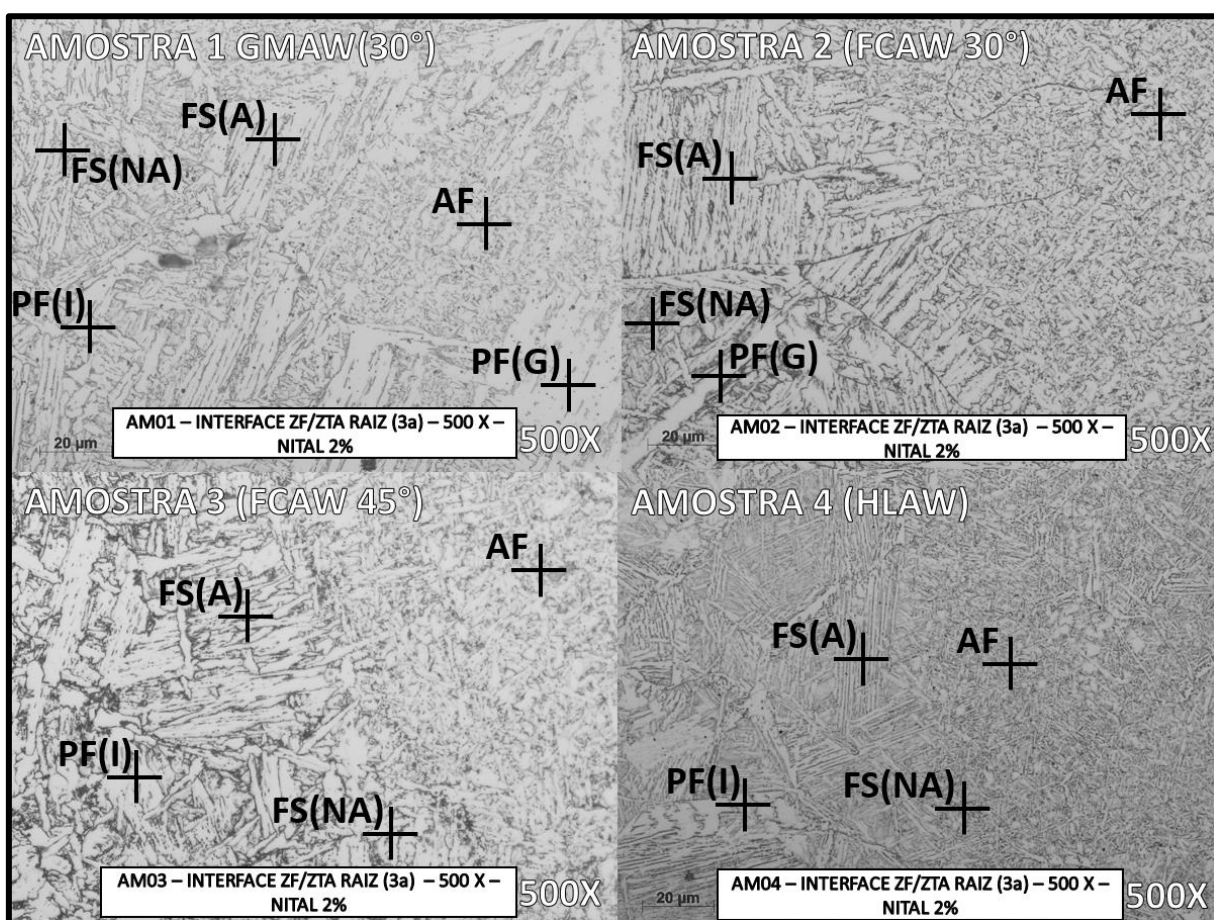
A figura 50 apresenta as micrografias da interface entre ZF e ZTA na região da raiz da solda para as quatro amostras soldadas. É possível verificar na imagem as linhas de fusão da interface da ZTA com a ZF, através dos diferentes tamanhos de grão da região à esquerda e à direita das imagens.

As designações das microestruturas da região mais à esquerda das amostras, se assemelharam às apresentadas nas regiões 2a e 2b. Na região mais à direita, região da ZF, é possível verificar, em sua grande maioria, ferrita acicular (AF), que é normalmente encontrada no metal de solda.

Na amostra 2, também se verificou a linha de contorno de grão bastante evidente.

Na amostra 4, novamente, os grãos apresentaram um refino maior, sendo, portanto, menores que as demais amostras.

Figura 50 – Micrografia da interface entre ZF e ZTA na raiz da junta (3a) para as quatro amostras. À esquerda de cada uma das imagens, está a ZTA. À direita, está a ZF.



Fonte: O autor (2023)

A figura 51 apresenta as micrografias da interface entre ZF e ZTA na região do reforço da solda para as quatro amostras soldadas. Na imagem, é possível verificar as linhas de fusão

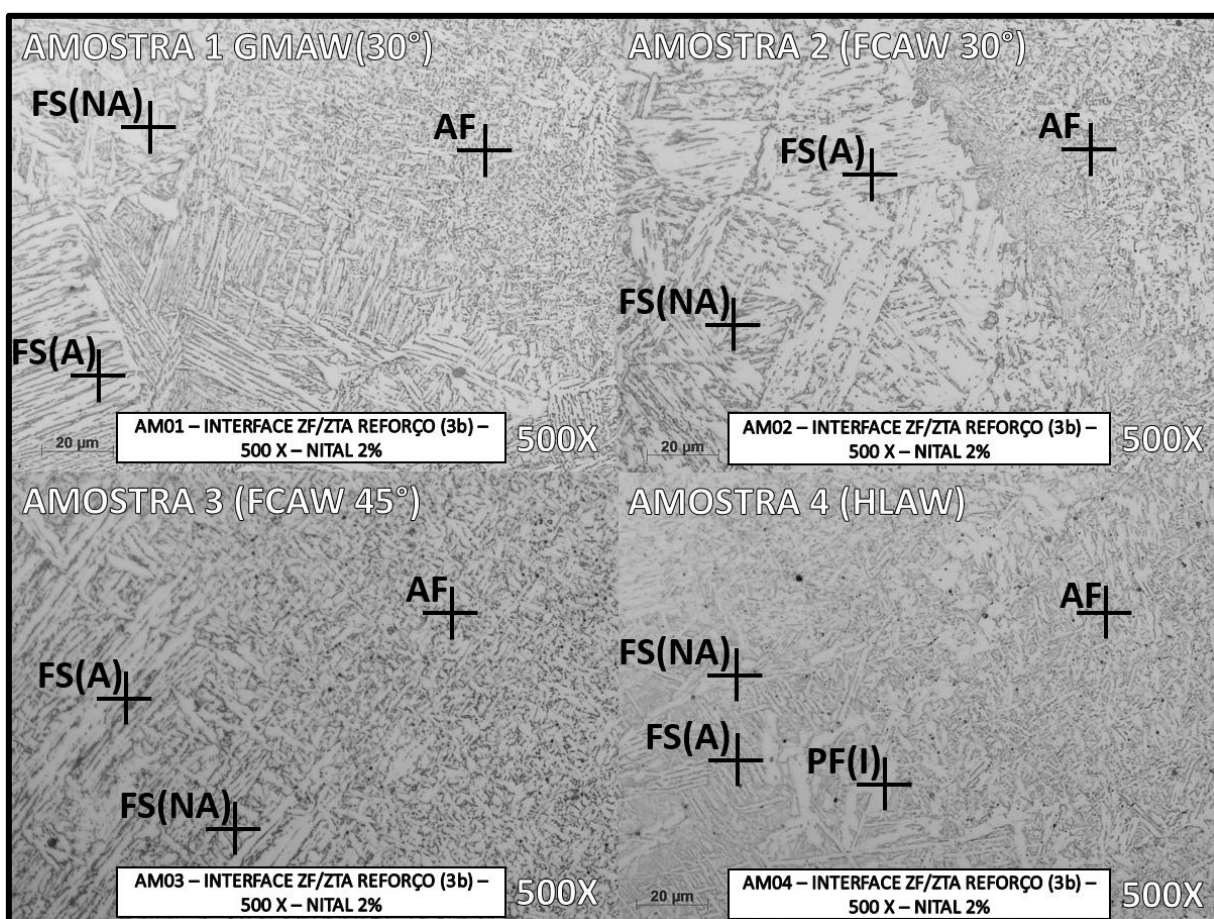
da interface da ZTA com a ZF, através dos diferentes tamanhos de grão da região à esquerda e à direita das imagens.

As designações das microestruturas da região mais à esquerda das amostras, se assemelharam às apresentadas à esquerda da região 3a. A região mais à direita, região da ZF, novamente apresentou, em sua grande maioria, ferrita acicular (AF).

Na amostra 4, novamente, os grãos apresentaram um refino maior, sendo, portanto, menores que nas demais amostras.

Pela diferença de calor aplicado entre as regiões da raiz da solda e do reforço da solda, se esperavam mudanças maiores nas microestruturas destas zonas, o que não se concretizou.

Figura 51 – Micrografia da interface entre ZF e ZTA no reforço da junta (3b) para as quatro amostras. À esquerda de cada uma das imagens, está a ZTA. À direita, está a ZF.

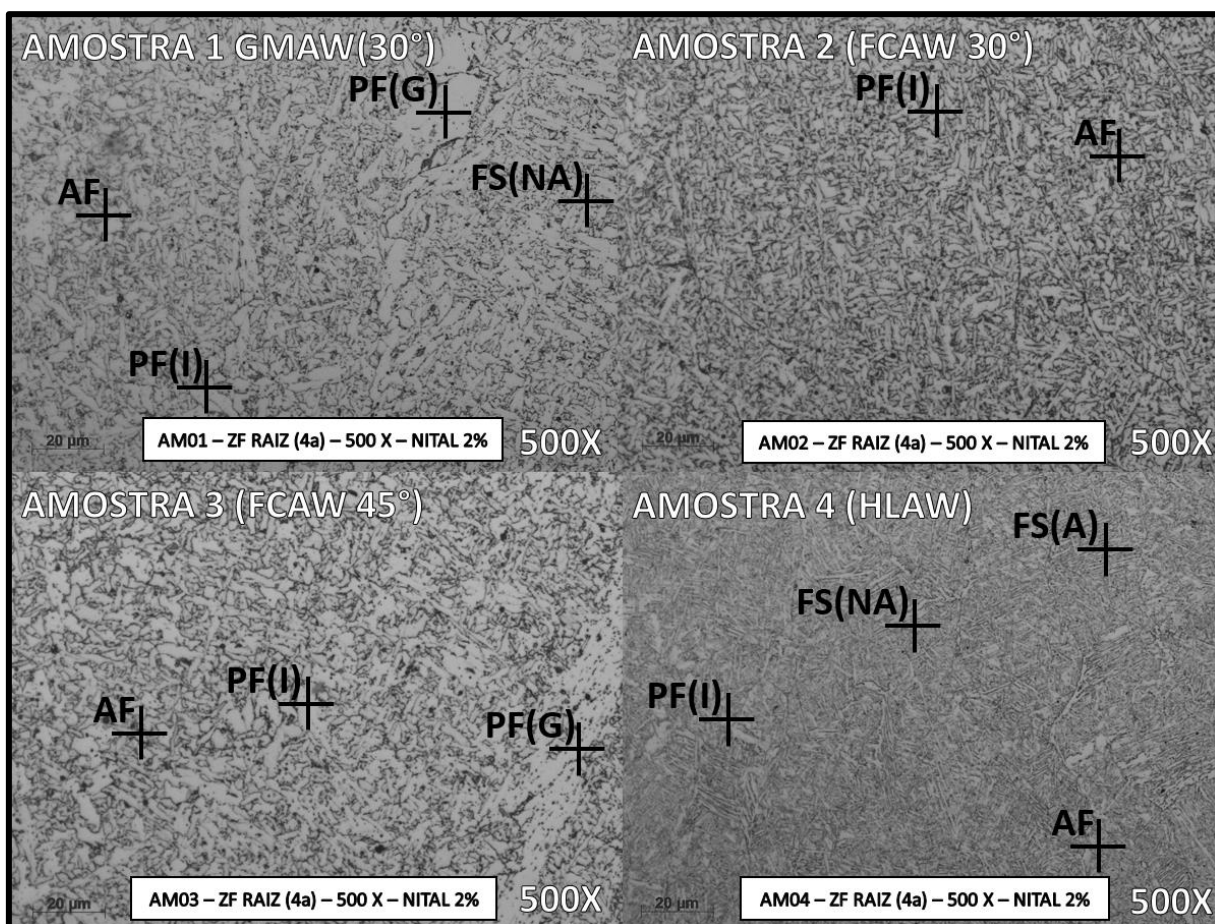


Fonte: O autor (2023)

A figura 52 apresenta as micrografias da ZF da raiz da solda para as quatro amostras soldadas. Todas as microestruturas apresentaram, em sua maioria, ferrita acicular (AF), com

traços de ferrita de segunda fase, bem como ferrita primária. É possível observar, na amostra 1 e 3, a presença de PF(G). A amostra 4 apresentou um refino maior dos grãos.

Figura 52 – Micrografia da ZF na raiz da junta (4a) para as quatro amostras.



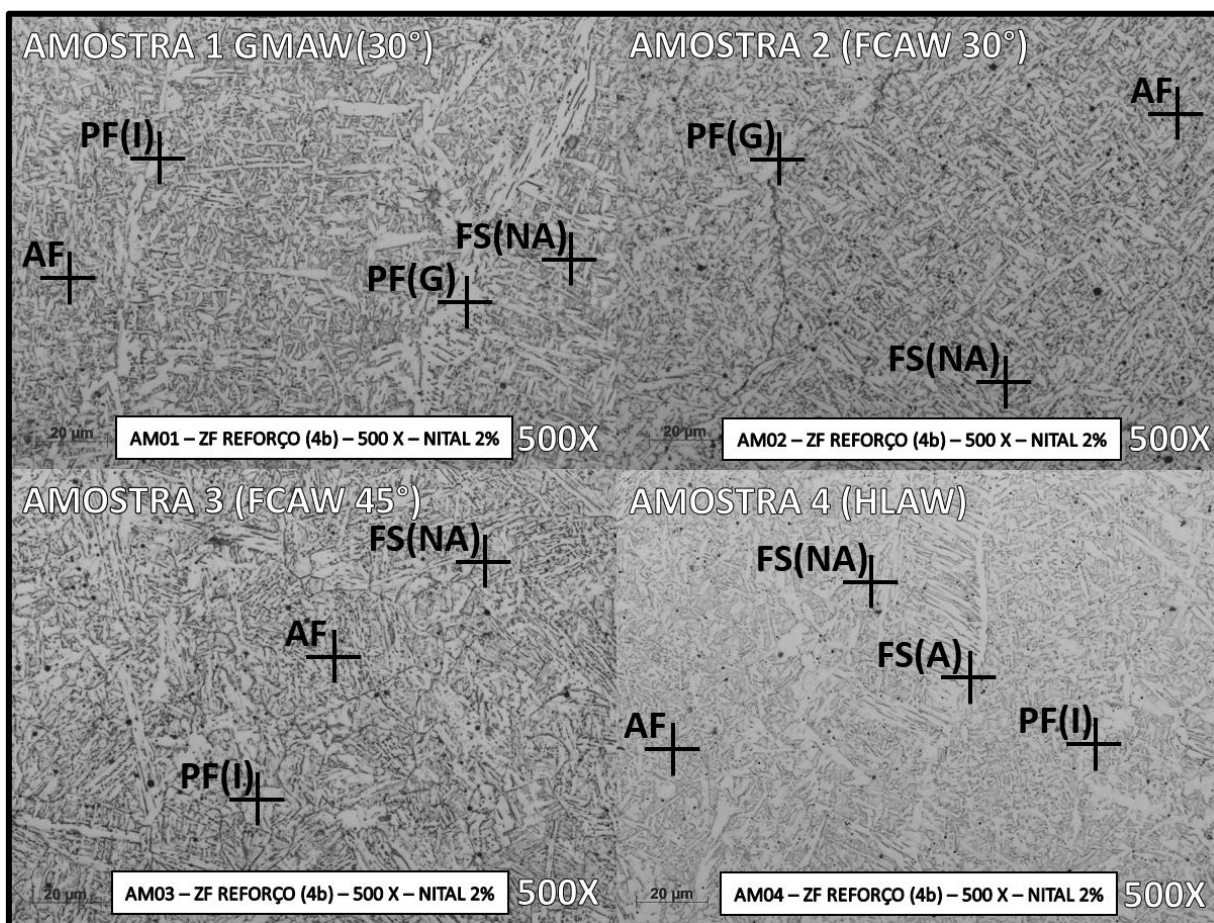
Fonte: O autor (2023)

A figura 53 apresenta as micrografias da ZF do reforço da solda para as quatro amostras soldadas. Todas as microestruturas foram semelhantes à zona 4a. Elas apresentaram, em sua maioria, ferrita acicular (AF), com traços de ferrita de segunda fase, bem como ferrita primária. É possível verificar as linhas de contorno de grão nas amostras 2 e 3, e, nas amostras 1 e 2, a presença de PF(G).

A amostra 4 apresentou um refino maior dos grãos. Também, apresentou uma designação de ferrita de segunda fase alinhada, sub-classificada como FS(SP), *side plate* ou mais conhecida por ferrita de Widmanstätten.

A amostra 3, apesar de sua geometria maior em relação às demais amostras e ao tempo de exposição às temperaturas de soldagem maiores, não apresentou, em nenhuma microestrutura, diferenças significativas para as demais amostras.

Figura 53 – Micrografia da ZF no reforço da junta (4b) para as quatro amostras.



Fonte: O autor (2023)

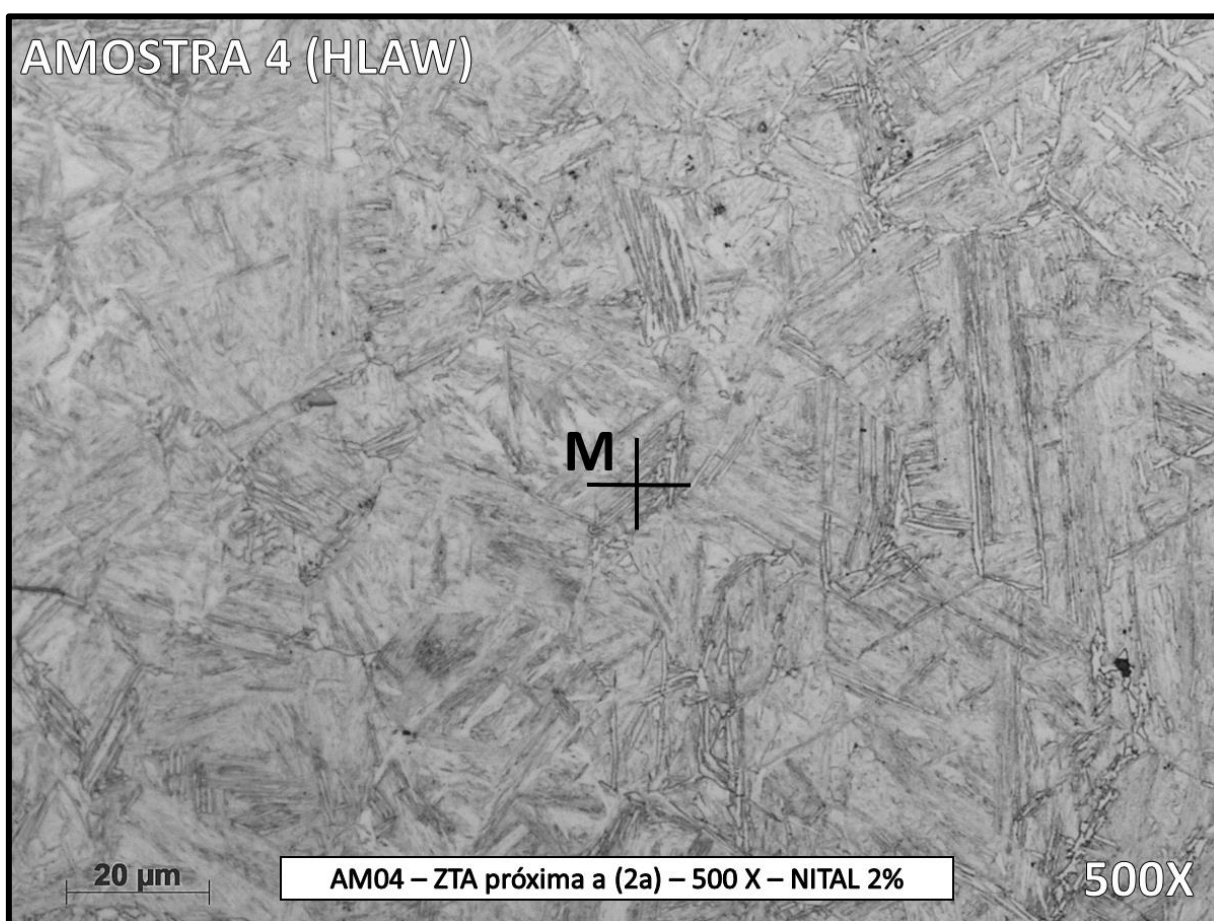
Durante as análises de micrografia nas zonas pré-determinadas no teste, foi encontrada uma microestrutura com característica semelhante à martensítica na amostra 4, um pouco acima da zona 2a, na região da ZTA, conforme apresenta a figura 54. Esta microestrutura apresentou característica de agulhas finas e alongadas, tradicional da martensita, porém, para se ter certeza da análise, é necessária maior amplificação no microscópio.

Na amostra 4, acredita-se que houve a facilidade na formação de martensita devido às temperaturas e aporte térmicos mais baixos do processo e, conseqüentemente, a temperatura de resfriamento 1,7 vezes menor em relação às demais amostras, conforme a tabela 13. Também, neste processo, apenas 2 cordões foram necessários para finalizar a soldagem, ou seja, não existiram cordões posteriores para revenir os cordões anteriores, assim aumentando a temperatura de resfriamento.

Para diminuição da microestrutura martensítica na amostra 4, tem-se como alternativa pré-aquecer a peça até 50°C antes de realizar a soldagem, elevando-se a temperatura inicial da peça antes de realizar a soldagem aumentará seu tempo de resfriamento e pode diminuir ou

eliminar a microestrutura martensítica, além de diminuir a chance da hipótese de falha por trinca de contração de acontecer. Porém, são necessários testes para realmente saber se essa solução será viável, primeiro para verificar se o pré-aquecimento realmente eliminará a martensita da junta, segundo, pois ao pré-aquecer a peça elevam-se os tempos de realização da soldagem e aumentam o custo da junta, sendo necessária realizar uma nova medição de tempos e de consumos de gases industriais, para comprovar a efetividade e retorno da ação.

Figura 54 – Microestrutura semelhante a martensita próxima a zona 2a correspondente a ZTA da amostra 4.



Fonte: O autor (2023)

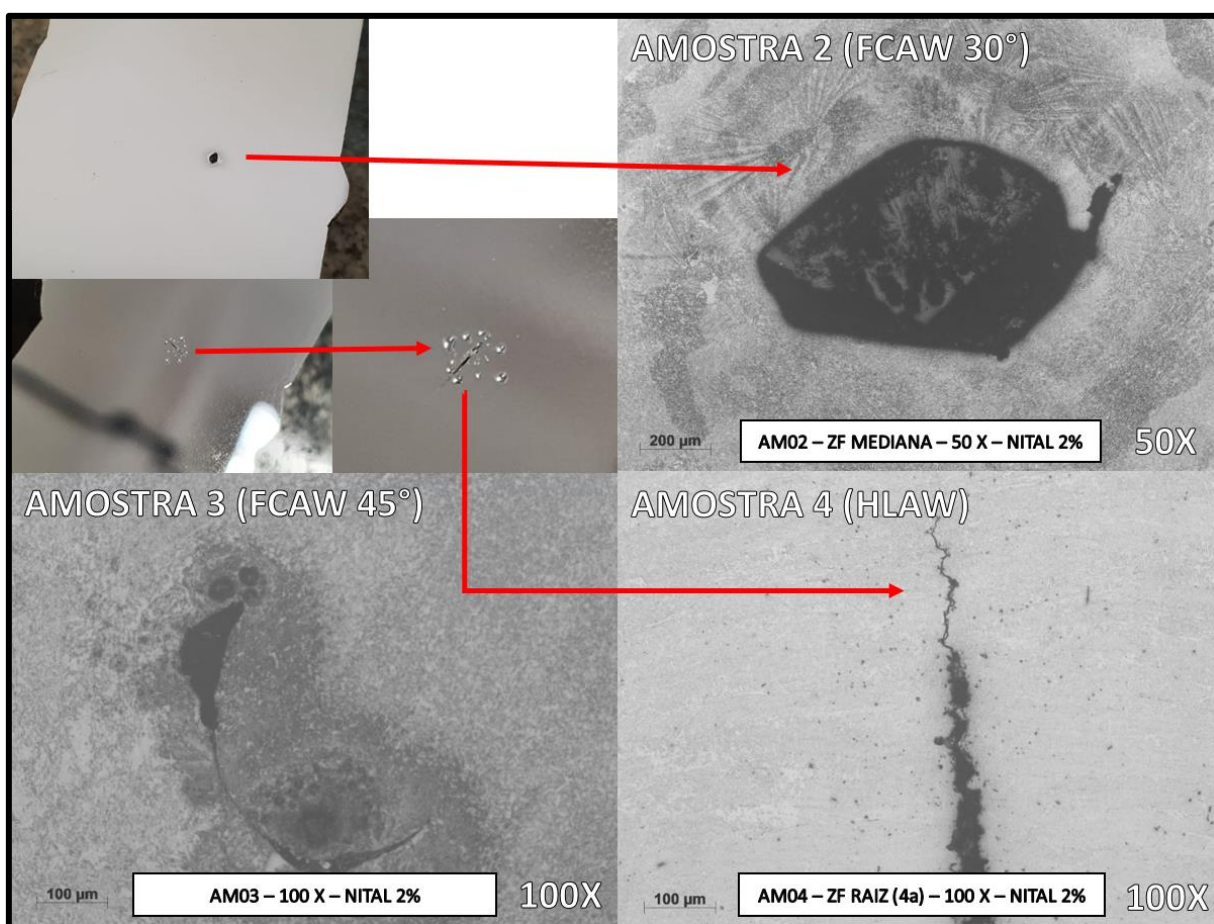
Os volumes de martensita estimados na tabela 13 não se confirmaram na prática. Nas amostras 1, 2 e 3, eles foram de aproximadamente 50% e 70% na amostra 4. A amostra 4 apresentou pouca quantidade de martensita, somente na região da figura 54.

A figura 55 mostra algumas descontinuidades das amostras 2, 3 e 4. As amostras 2 e 3 apresentaram inclusão de escória de arame tubular e a amostra 4 apresentou uma trinca na raiz da solda, aparentando ser uma falta de fusão na raiz de solda. A hipótese é que esta falta de fusão possa ter sido ocasionada pelo desvio do feixe do laser no momento da soldagem. Esta

trinca da amostra 4 também pode ser uma trinca de contração, que pode ocorrer pelo seu resfriamento súbito e até pela velocidade de soldagem elevada, onde a junta é mais propensa a sofrer uma contração das tensões acumuladas do cordão de solda. O tamanho do cordão também influencia, quanto mais profundo e estreito o cordão, maiores as chances de surgir a trinca, exatamente a situação encontrada neste processo. Como possíveis soluções, aumentar mais a largura do cordão, diminuir a velocidade de soldagem e até pré-aquecer a peças antes de soldar.

Destaca-se que esta trinca, na raiz da solda na amostra 4, foi observada no mesmo local nos ensaios de tração, dobramento e nas micrografias, levando-se a concluir que houve alguma falha procedimental, de parâmetros ou até da limitação do equipamento no momento da execução da soldagem e não da técnica.

Figura 55 – Descontinuidades encontradas nas micrografias das amostras 2, 3 e 4.



Fonte: O autor (2023)

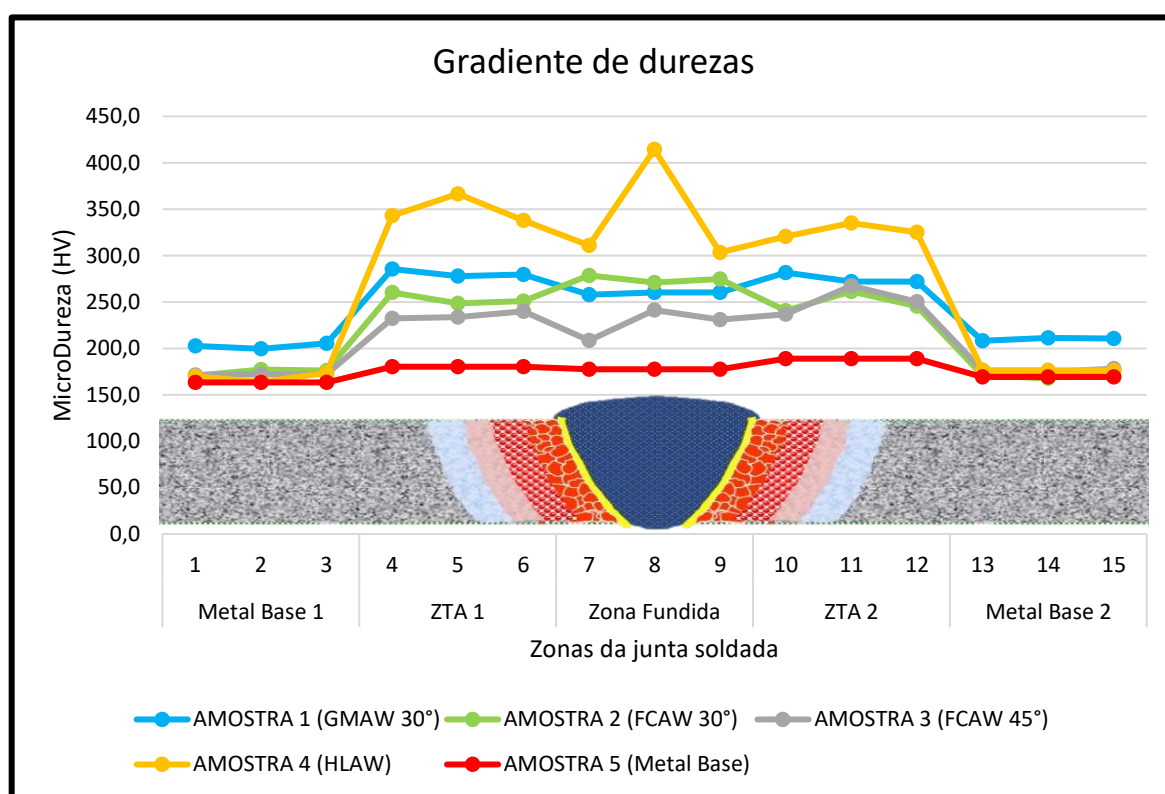
4.2.3 Microdureza

Os resultados do ensaio de microdureza Vickers podem ser verificados na tabela 19 do Apêndice D.

O gráfico da figura 56 demonstra os resultados de microdureza para cada amostra, divididos pelas zonas da junta soldada. Foi possível notar que as microdurezas medidas nas amostras 1, 2 e 3, soldadas manualmente, tiveram valores semelhantes e, ao mesmo tempo, não excederam o valor máximo estimado na tabela 13, de aproximadamente 322 HV.

A amostra 4 apresentou resultado semelhante à estimativa da tabela 13, de aproximadamente 364 HV, ultrapassando este valor apenas na região da ZF, que atingiu um valor próximo aos 414 HV.

Figura 56 – Gradiente de durezas entre as amostras.



Fonte: O autor (2023)

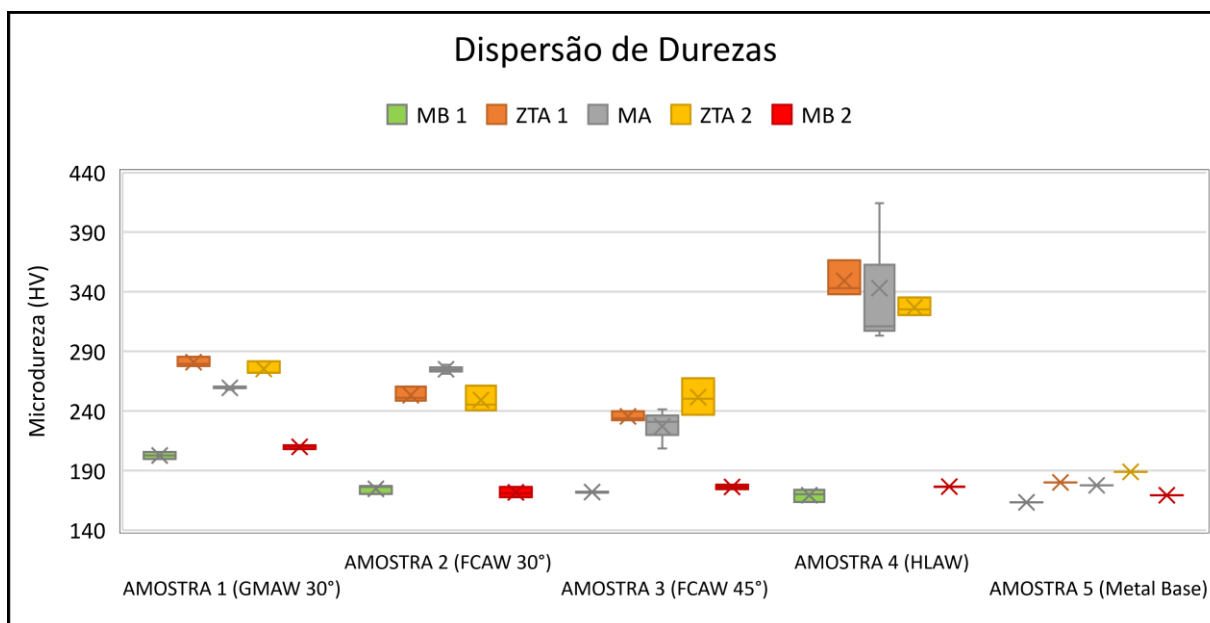
Através do gráfico, foi possível verificar que, no metal de base, as amostras 2, 3 e 4 apresentaram valores de microdureza muito próximos ao do metal de base sem solda (amostra 5), com média de 175 HV. A microdureza da amostra 1 ficou um pouco acima das demais, chegando aos 200 HV de média.

Na zona termicamente afetada (ZTA), as dispersões de dados foram maiores. A amostra 4 apresentou a maior dureza, se aproximando dos 350 HV de média. As amostras 2 e 3, soldadas pelo processo FCAW, apresentaram valores próximos aos 250 HV de média. E a amostra 1 ficou com microdureza na ZTA um pouco acima das amostras 2 e 3, com média de 280 HV.

Na zona fundida, novamente, a amostra 4 apresentou a maior dureza, com média de 342 HV. A amostra 2 apresentou a segunda maior dureza na ZF, com 274 HV de média. A amostra 1 se aproximou da amostra 2, com 259 HV de média. E, por último, a amostra 3 apresentou a menor dureza em relação às amostras na ZF, com 227 HV de média.

A figura 57 apresenta a dispersão de dados de microdureza para as quatro amostras. A amostra 5 do metal de base, sem solda, apresentou valor médio de 175,8 HV medido em 15 pontos.

Figura 57 – Gráfico de dispersão de dados das microdurezas.



Fonte: O autor (2023)

A dureza se mostrou mais elevada na amostra 4 em relação às demais, devido à sua temperatura menor, que, por sua vez, diminuiu o tempo de resfriamento da peça, conforme demonstrado na tabela 13.

O fato da dureza ter sido encontrada com valor mais alto na amostra 4, justifica a possibilidade de existência de martensita encontrada na figura 54, pois a elevação da dureza é uma característica da fase martensítica.

Entretanto, esta elevação de dureza e a possível formação de martensita na amostra 4, não foram suficientes para aumentar a fragilidade da peça, pois, nos ensaios de tração, a amostra

4, mesmo propagando levemente a descontinuidade e aumentando o tamanho da falha, rompeu no MB e não na região soldada.

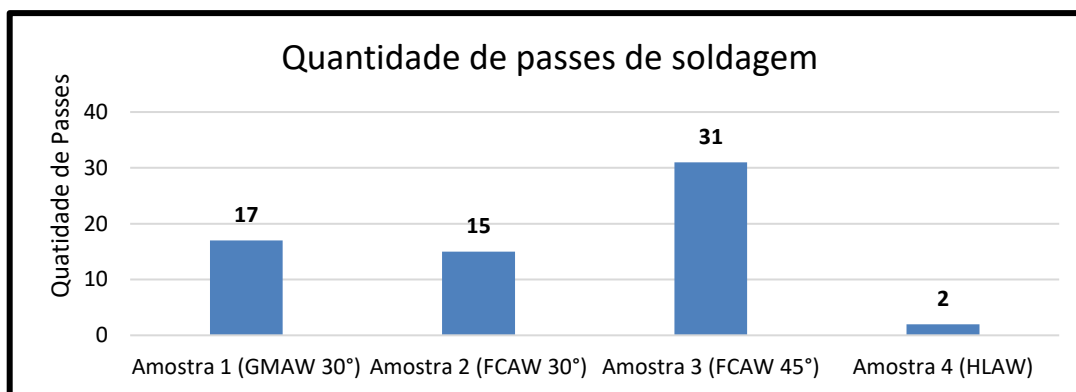
4.3 COMPARAÇÕES PRODUTIVAS DOS PROCESSOS

Os dados completos de produtividade de cada processo podem ser visualizados na tabela 16 do apêndice B.

Com base nos valores obtidos na tabela 16, foi realizada uma análise estatística do processo pelo método de análise de variância, podendo ser verificada nas tabelas 20 e 21 do apêndice E. O resultado obtido neste teste mostrou que o valor de prova entre as amostras foi menor que o erro de 5%. Portanto, estatisticamente, as amostras são diferentes quando às comparamos nos parâmetros produtivos. As diferenças entre os processos, evidenciadas no teste ANOVA, são apresentados a seguir.

Após a realização de todos os procedimentos de soldagem e através de todos os dados coletados, foi possível elaborar diversos gráficos comparativos entre as quatro amostras. A figura 58 evidencia as diferentes quantidades de passes de soldagem entre os processos.

Figura 58 – Gráfico comparativo da diferença de quantidade de passes de soldagem para cada processo.



Fonte: O autor (2023)

Nas amostras 1 e 2, que possuem a mesma geometria, as soldagens apresentaram quantidades de passes próximos.

A amostra 3, com sua geometria de bisel de 45°, necessitou mais que o dobro de passes, quando comparada à amostra 2, sendo o processo mais extenso que os demais e não contribuindo para a produtividade e o aporte térmico.

Na amostra 4, ficou evidente o ganho de produtividade em relação às demais. Para atingir a penetração total, foram necessários apenas dois passes de soldagem, sendo um de cada

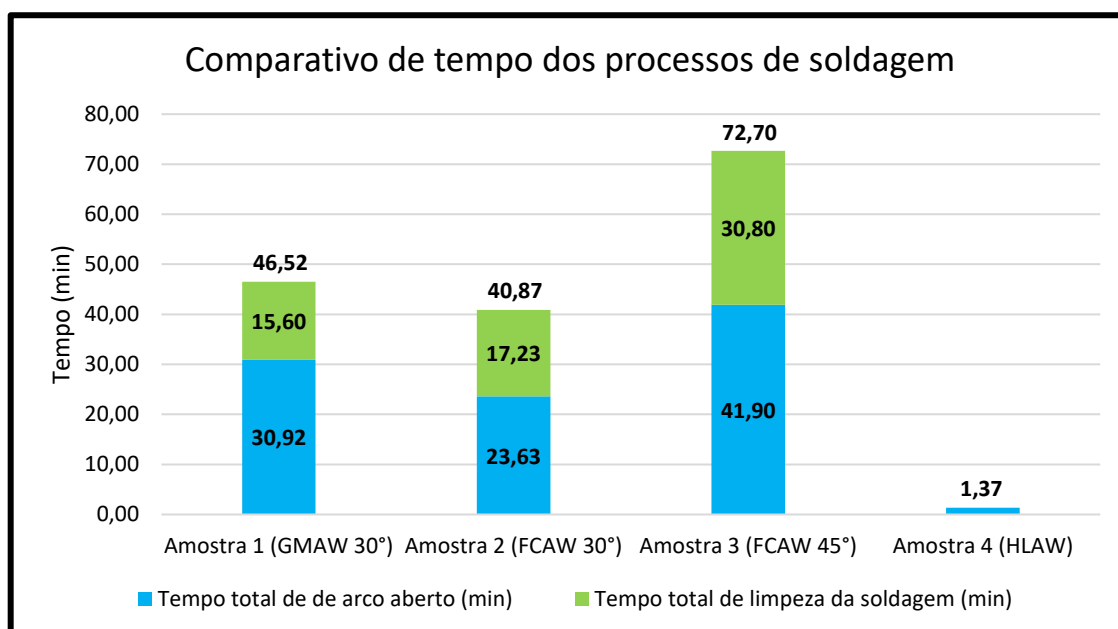
lado da peça. Ficou clara a desvantagem do processo HLAW no projeto proposto para a junta, pois necessita de tombamento da peça para soldagem.

Estas diferenças verificadas na figura 58 voltaram a ficar evidentes na figura 59. Neste gráfico, foi constatado o tempo para realização do procedimento de cada amostra.

Na amostra 4, o procedimento foi aproximadamente 50 vezes menor do que na amostra 3 e 30 vezes menor do que nas amostras 1 e 2.

Nas amostras 1, 2 e 3, ainda se fez necessário o tempo de limpeza dos cordões de soldagem. Novamente, as amostras 1 e 2 se aproximaram em resultados e a amostra 3 apresentou resultado superior.

Figura 59 - Gráfico comparativo da diferença de tempo total de processo de cada amostra.



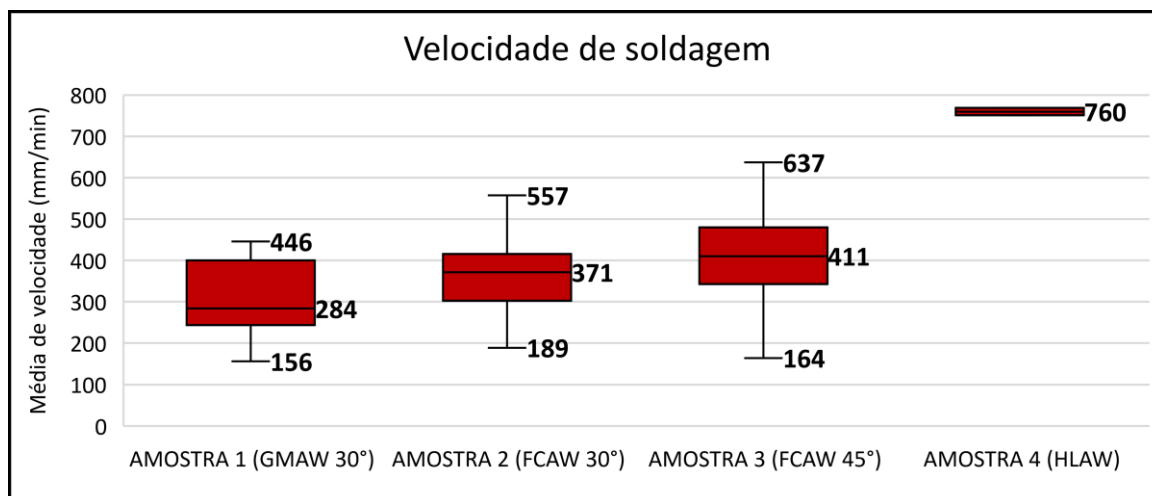
Fonte: O autor (2023)

A figura 60 mostra um comparativo das velocidades de soldagem obtidas entre os processos.

Na amostra 4, a velocidade de soldagem foi 2,4 vezes maior do que na amostra 1. Com relação à amostra 2, a velocidade de soldagem foi 2,1 vezes maior e comparada à amostra 3 foi 1,8 vezes maior.

Nas amostras 1, 2 e 3, foi possível perceber diferenças entre as velocidades de soldagem, mesmo sendo os três processos manuais, pois os valores apresentados foram as médias entre os passes de soldagem de cada processo. Além disto, nas 3 amostras, o controle da velocidade ficou restrito ao movimento do soldador, o qual variou muito.

Figura 60 - Gráfico comparativo de velocidade de soldagem entre os processos.



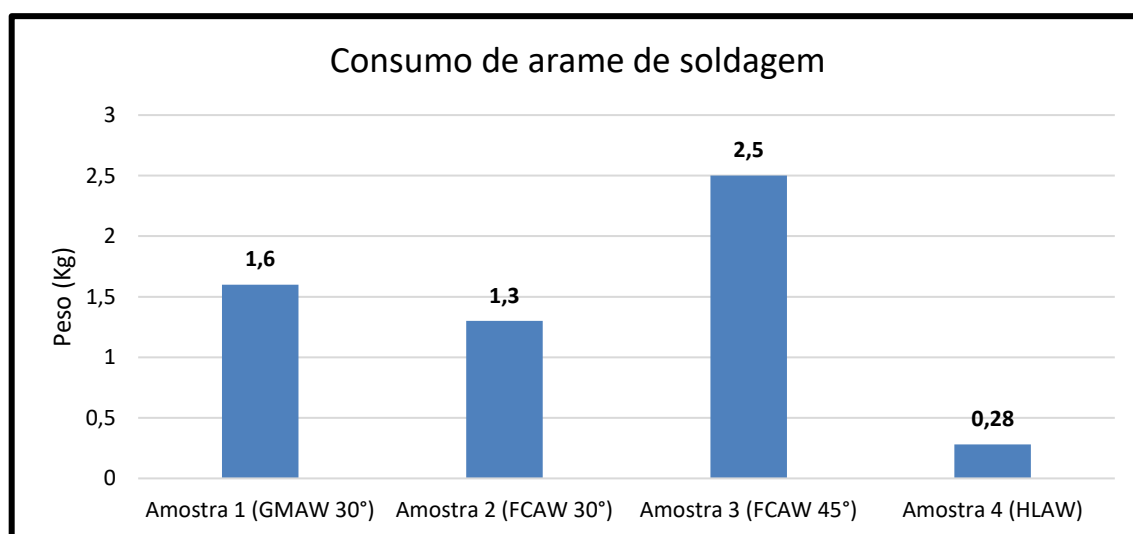
Fonte: O autor (2023)

O consumo de materiais para a soldagem também foi um quesito em que a amostra 4 se sobressaiu em relação às demais. Nas figuras 61 e 62, é possível verificar um consumo 4 vezes menor de arame e 20 vezes menor de gás de proteção em relação à amostra 2, sendo a segunda amostra que menos consumiu.

Portanto, fica evidente que os ganhos da amostra 4 não foram somente em produtividade, mas também este processo reduziu muito o custo da operação.

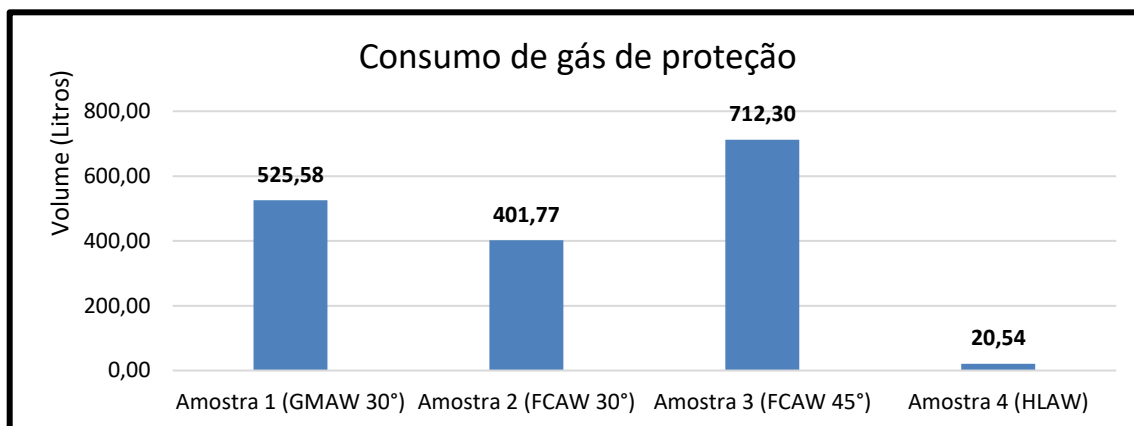
A amostra 3, com chanfro maior, mostrou-se inviável, tanto em produtividade, quanto em consumo de materiais. As amostras 1 e 2, devido à mesma geometria, mostraram-se muito próximas.

Figura 61 - Gráfico comparativo de consumo de arame entre os processos.



Fonte: O autor (2023)

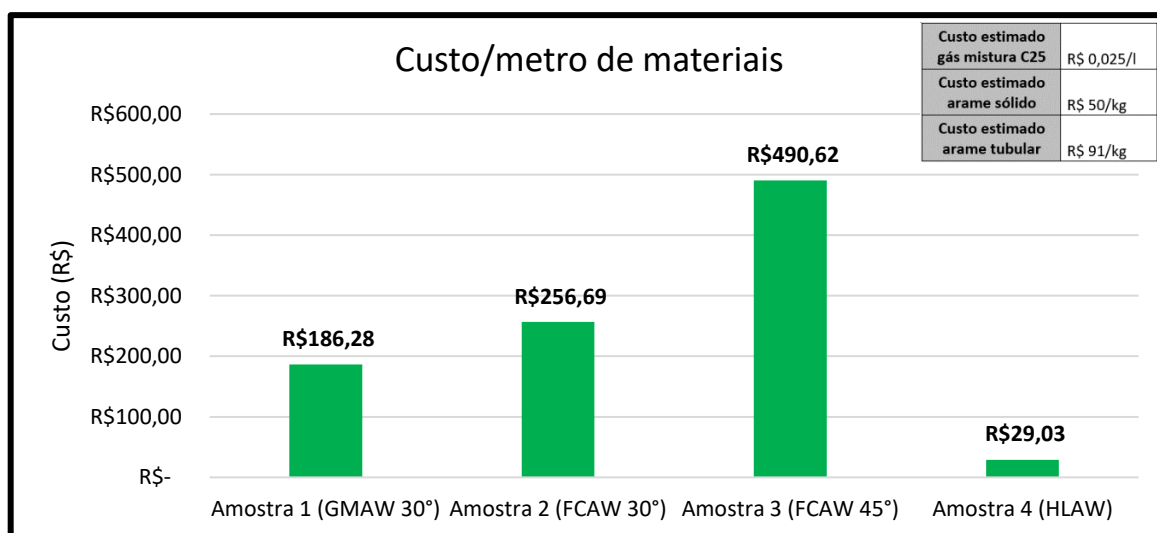
Figura 62 - Gráfico comparativo de consumo de arame entre os processos.



Fonte: O autor (2023)

O gráfico de custos por metro de soldagem é apresentado na figura 63. Nele, a amostra 1 apresenta vantagem por utilizar o arame sólido em relação à amostra 2, sendo o custo deste arame mais baixo, logo, o custo para realizar o procedimento é menor. A amostra 3, novamente, apresenta o pior cenário, e a amostra 4 possui uma redução de 17 vezes em relação ao processo atual da amostra 3.

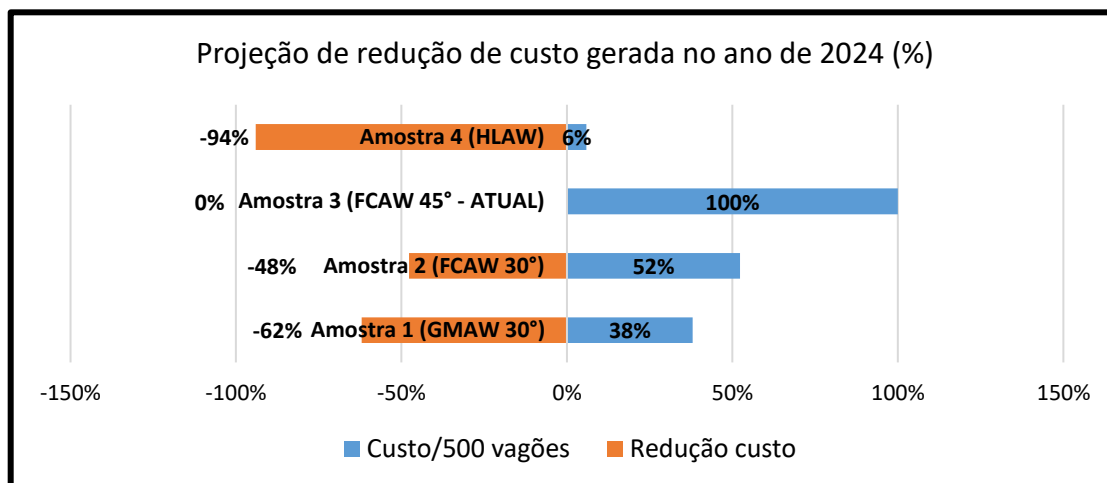
Figura 63 – Gráfico de custo com materiais (arame e gás) para realizar 1 metro de soldagem em cada processo.



Fonte: O autor (2023)

A projeção de vendas de vagões para 2024 na Randon Implementos é de aproximadamente 500 vagões. Considerando-se que cada vagão possui, em média, 4 juntas soldadas neste formato, a projeção de redução de custo gerada em cada processo para ano de 2024 é apresentada no gráfico da figura 64.

Figura 64 – Projeção de redução de custo para cada processo no ano de 2024

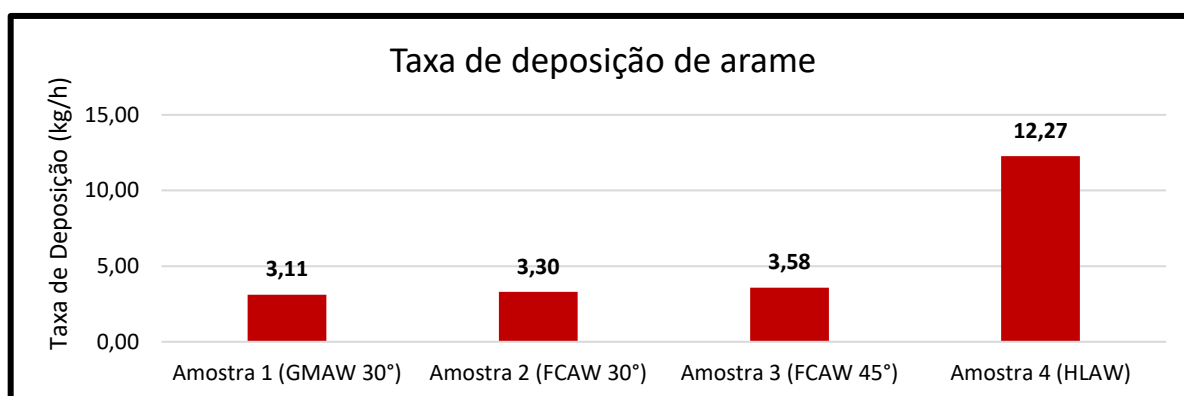


Fonte: O autor (2023)

Em relação à deposição de material de adição, a figura 65 traz dados comparativos, mostrando paridade entre todos os processos manuais, sendo o arame tubular levemente superior em relação ao arame sólido.

A amostra 4 mostrou a mais alta taxa de deposição (12,27 kg/h). Como seu processo consumiu pouco arame, o resultado esperado no trabalho era um número abaixo dos demais. A taxa de deposição depende do tempo do processo, e o tempo de execução da soldagem foi mais baixo que as demais amostras, portanto, a taxa de deposição foi mais alta. Este processo depositou mais material em um tempo menor.

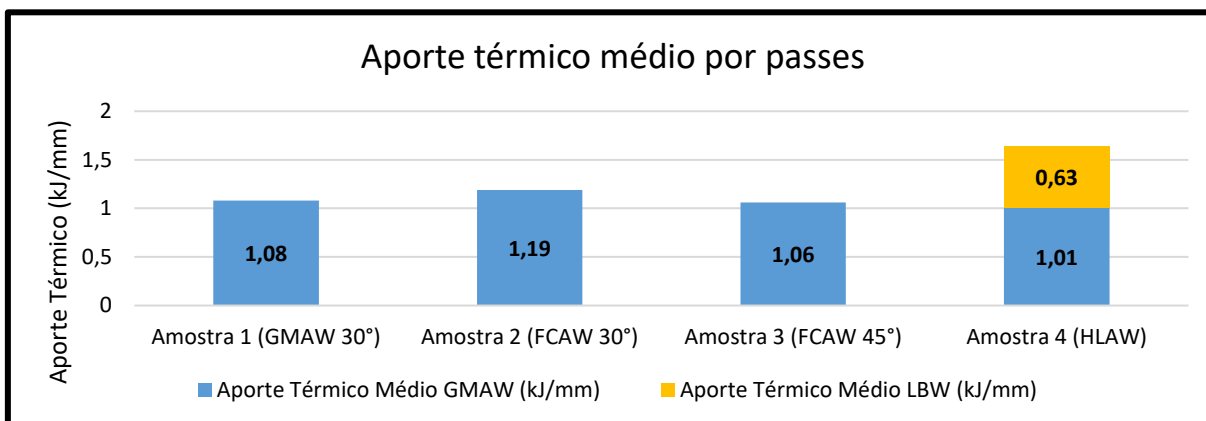
Figura 65 - Gráfico de comparação das taxas de deposição entre os processos.



Fonte: O autor (2023)

Com relação ao aporte térmico médio dos passes em cada processo de soldagem, todas as amostras permaneceram dentro da faixa de segurança estipulada no trabalho, conforme apresentado na tabela 9. A figura 66 apresenta os dados de aporte térmico médio de todos os passes de cada uma das amostras.

Figura 66 - Gráfico de comparação dos aportes térmicos médios entre os processos.

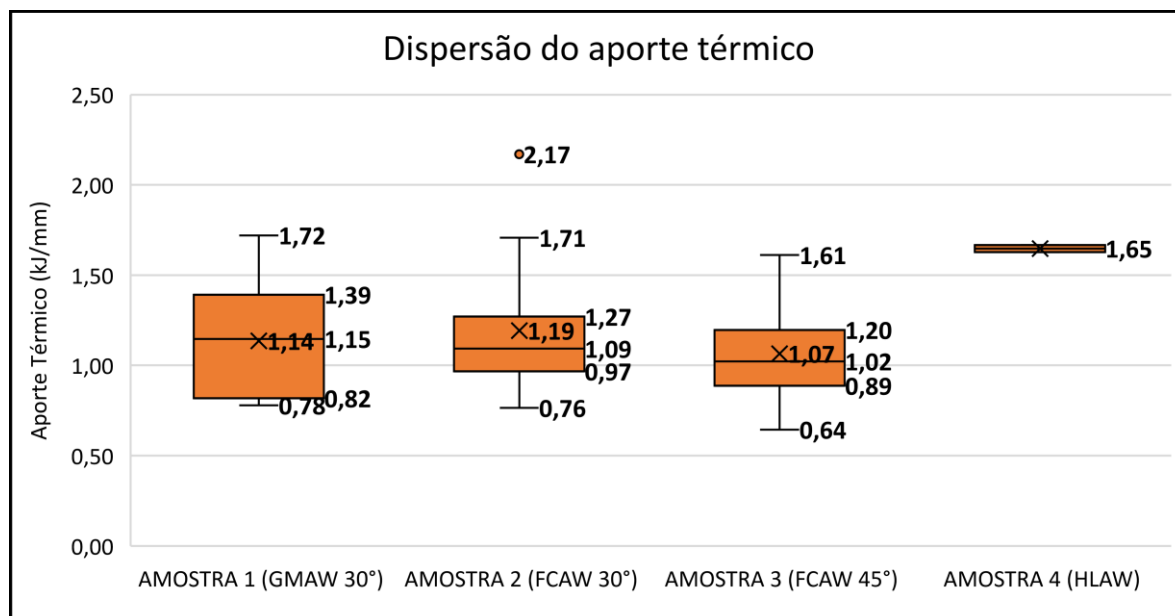


Fonte: O autor (2023)

Na amostra 4, o aporte térmico médio do Laser+MAG foi mais alto do que nos demais processos, sendo mais concentrado na junta soldada, devido ao feixe de laser agir de maneira mais focal na ZF, se espalhando menos para o restante do MB através das medições de temperatura feitas.

Com os dados de aporte térmico coletados foi possível gerar a dispersão dos mesmos para confirmar os dados coletados na figura 66. A figura 67 traz esses dados, mostrando que com o aporte térmico ficou acima de 2 kJ/mm e abaixo de 1 kJ/mm em alguns pontos.

Figura 67 - Gráfico de dispersão dos aportes térmicos dos processos

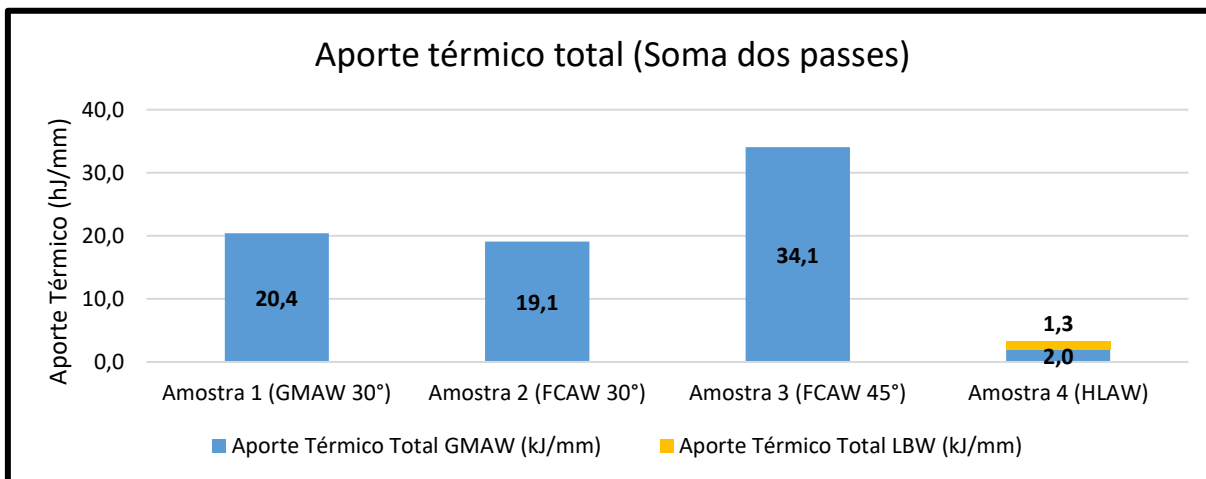


Fonte: O autor (2023)

A figura 68 apresenta os dados de aporte térmico total, sendo a soma dos aportes térmicos de todos os passes de soldagem para cada amostra, que se mostrou proporcional ao

número de passes. Dessa forma, a amostra 3 apresentou o maior aporte térmico e maior temperatura de interpasse, e a amostra 4 apresentou ambos menores.

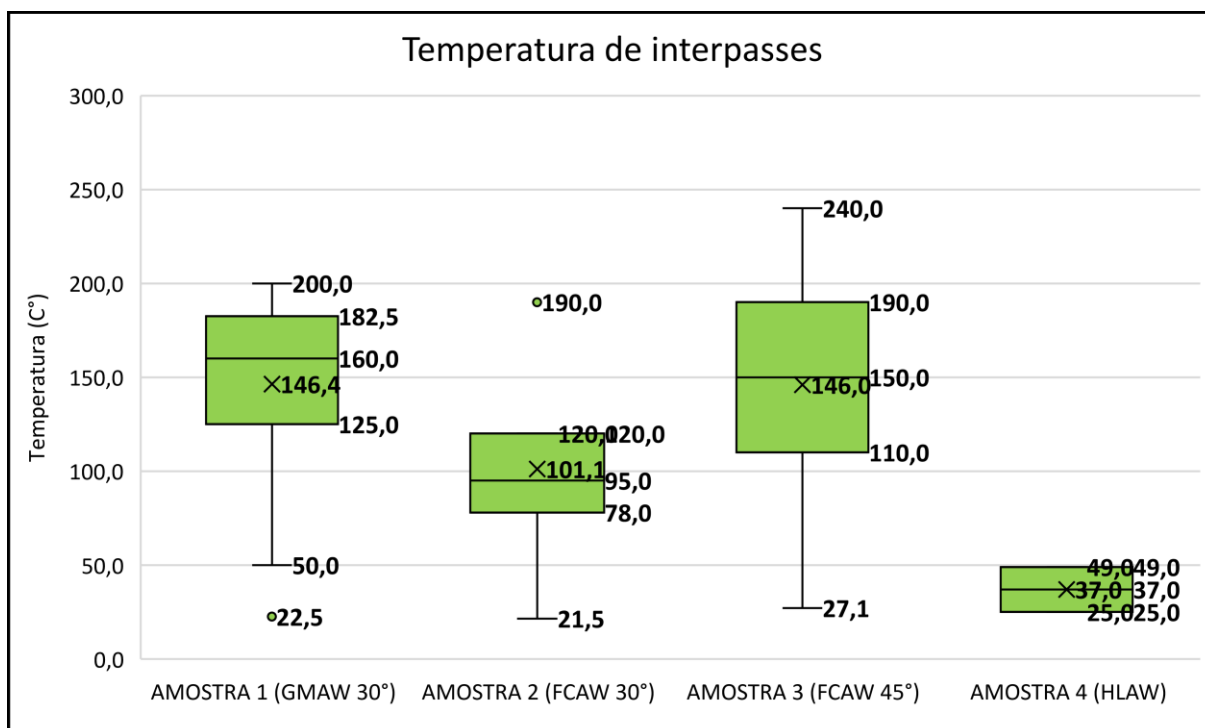
Figura 68 - Gráfico de comparação dos aportes térmicos totais entre os processos.



Fonte: O autor (2023)

Além de ser menor, A amostra 4 foi submetida por menos tempo ao aporte térmico e, por este motivo, sua ZTA e sua temperatura de interpasse foram menores. Todas as amostras apresentaram temperaturas de interpasse dentro das faixas de parâmetros de segurança definidas na tabela 9. A figura 69, mostra os dados de temperatura de interpasse.

Figura 69 - Gráfico de comparação das temperaturas de interpasse entre os processos.

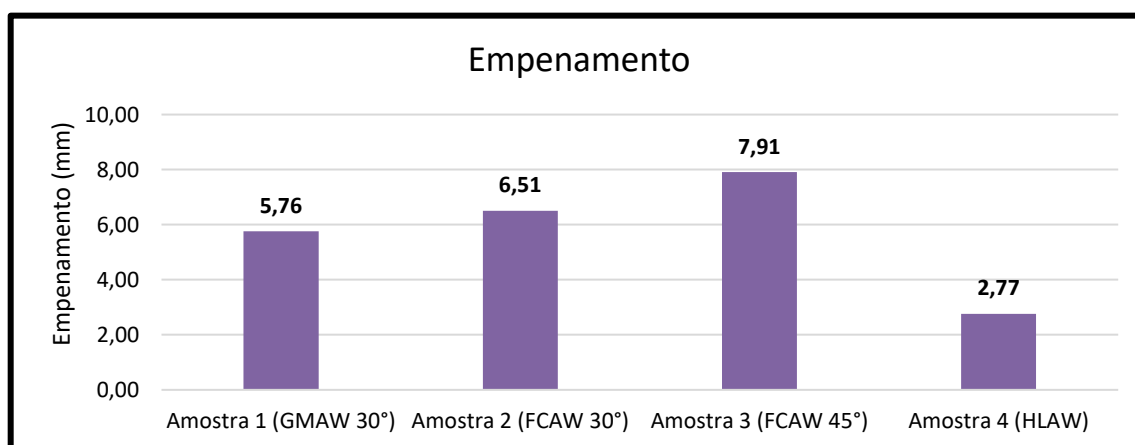


Fonte: O autor (2023)

O aporte térmico influenciou no empenamento das amostras. Foi percebido que, a amostra 3 apresentou maior empenamento, sendo proporcional ao aporte de temperatura na junta, o que ficou evidente através de linha traçada na figura 38.

As amostras 1 e 2 foram semelhantes visualmente. A amostra 4 aparentou ter um pequeno empenamento. Cabe ressaltar que, quando as faces das chapas se tocam para realizar a soldagem, qualquer imperfeição nas suas faces, provocado pela qualidade do corte térmico, pode acarretar num desalinhamento e, conseqüentemente, no empenamento. Não se acredita que o calor gerado foi suficiente para causar o empenamento na chapa, pois imediatamente após o término do procedimento de soldagem, a peça foi segurada com a mão, sem luvas de proteção, além de seu aporte térmico ter sido baixo em relação aos demais. Os empenamentos são comparados na figura 70.

Figura 70 – Gráfico de comparativo de empenamento entre as amostras



Fonte: O autor (2023)

4.4 CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO

Com relação aos custos de implementação dos processos GMAW e FCAW, são necessárias apenas as máquinas de solda, recurso já existente na empresa, e a alteração das instruções e dos parâmetros de soldagem. Caso seja julgado importante, pode ser adquirido um equipamento mais moderno, como sugestão, uma fonte Fronius Transteel 5000, no valor de aproximadamente R\$ 150.000,00.

Para a implementação do processo HLAW, o investimento se torna bastante elevado, a tabela 14 apresenta os custos estimados de implementação total de uma célula para a aplicação testada no trabalho.

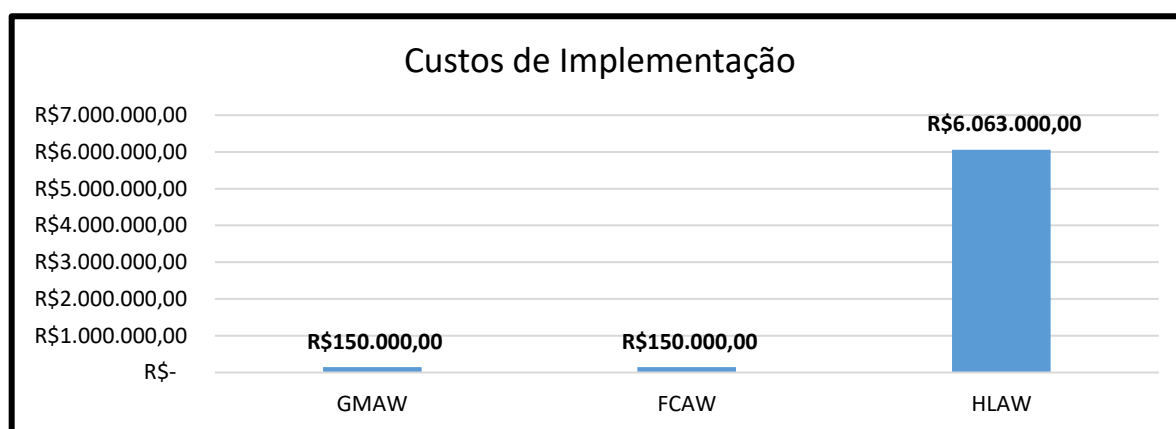
Tabela 14 – Custos para implementação do processo HLAW.

Componente	Valor unitário	Quantidade	Valor total
Fonte Laser 8kW LaserLine	R\$ 743.000,00	1	R\$ 743.000,00
Cabeçote óptico laser	R\$ 250.000,00	2	R\$ 500.000,00
Cabo de Fibra Óptica de 20 metros	R\$ 85.000,00	2	R\$ 170.000,00
Célula enclausurada 20000x3000	R\$ 500.000,00	1	R\$ 500.000,00
Braço de Robô KUKA	R\$ 400.000,00	1	R\$ 400.000,00
Fonte de Soldagem Fronius Sinérgica Transteel 5000	R\$ 150.000,00	2	R\$ 300.000,00
Chiller de refrigeração	R\$ 400.000,00	2	R\$ 800.000,00
Dispositivo para fixação e montagem das peças a serem soldadas	R\$ 2.000.000,00	1	R\$ 2.000.000,00
Frete e instalação	R\$ 350.000,00	1	R\$ 350.000,00
Integração do sistema	R\$ 300.000,00	1	R\$ 300.000,00
Total			R\$ 6.063.000,00

Fonte: O autor (2023)

A figura 70 apresenta a comparação dos custos de implementação entre os três processos testados no trabalho.

Figura 71 – Gráfico comparativo dos custos de implementação dos 3 processos testados.



Fonte: O autor (2023)

4.5 PAYBACK DO INVESTIMENTO DO PROCESSO HLAW

Foi realizado um cálculo de *Payback* simples, para se ter uma base do retorno do investimento do processo HLAW, conforme a equação 4.

$$\text{Payback Simples} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Incremento de receita}} \quad (4)$$

O processo HLAW aumentará a produtividade, mas não a quantidade de vendas de vagões, pois o gargalo não é a operação da junta apresentada. Porém, utilizando esse processo, reduziram-se os custos operacionais e a mão de obra de dois soldadores, logo, foi realizado o

cálculo utilizando o valor de redução de custos, no lugar do incremento de receita, optando-se por manter esse valor oculto. Assim, o retorno do investimento se dará em pouco mais de 12 anos, pagando-se o equipamento somente com as reduções de custo que ele trará, dessa forma não justificando seu investimento.

5 CONCLUSÕES

Todos os objetivos inicialmente lançados neste estudo foram alcançados. Com base nos ensaios realizados, nos resultados obtidos e comparando o processo atual com os propostos, concluiu-se que:

- a) as amostras soldadas de forma manual, através dos processos GMAW e FCAW, foram todas aprovadas nos ensaios de tração, sem falhas, atendendo ao limite mínimo de resistência à tração do metal de base;
- b) a amostra soldada no processo HLAW teve um CP de tração reprovado, devido à presença de trinca considerável na raiz da solda;
- c) o HLAW rompeu no metal de base, acima de seu limite mínimo de resistência à tração;
- d) através da análise de variância, todos os processos tiveram desempenhos estatisticamente iguais nos ensaios de tração. Portanto, mesmo o processo HLAW apresentando uma falha, foi concluído que houve alguma falha procedimental, de parâmetros ou até da limitação do equipamento no momento da execução da soldagem e não da técnica;
- e) todos os processos foram aprovados nos ensaios de dobramento;
- f) o processo FCAW, com bisel de 45°, apresentou a maior ZTA. O processo HLAW apresentou a menor ZTA. Não sendo determinante de falha em nenhum processo;
- g) o processo HLAW apresentou a maior penetração nos ensaios de macrografia, sendo seguido pelos três outros processos;
- h) todos os processos apresentaram microestruturas semelhantes ao longo da junta soldada, sendo ela basicamente composta por ferrita primária e ferrita de segunda fase. O processo HLAW foi o único que apresentou microestrutura martensítica, devido à menor temperatura atingida pela junta soldada e ao menor tempo de resfriamento. O HLAW também apresentou maior refino de grão;
- i) o processo HLAW apresentou trincas em três ensaios diferentes na raiz da solda. Sendo que essa trinca pode ser ocasionada por falta de fusão através da limitação do equipamento de soldagem ou falha de parâmetros, pelo desvio do foco do feixe de laser, ou a principal hipótese, por uma trinca de contração que surge logo após finalização da soldagem.

- j) os processos FCAW, com diferentes geometrias, apresentaram inclusão de escória em diferentes pontos.
- k) o único processo que não apresentou falhas evidentes ao longo do trabalho foi o GMAW;
- l) os processos GMAW e FCAW apresentaram durezas semelhantes ao longo de todas as zonas de soldagem, com valores entre 250 e 280 HV. O processo HLAW apresentou dureza próxima à 414 HV, devido à temperatura menor, tempo de processo mais curto e de resfriamento mais rápido. Este valor de dureza reforçou a existência da martensita na amostra do processo HLAW;
- m) o processo HLAW apresentou ganho de produtividade de 50 vezes em relação ao processo atual. Apresentou também a maior velocidade de soldagem, sendo 1,8 vezes mais rápido, sendo o processo mais produtivo;
- n) o processo HLAW apresentou custo/metro 16,8 vezes menor que o processo atual FCAW 45°;
- o) a projeção de redução de custo utilizando o processo HLAW, no ano de 2024, foi de 94%, seguido do processo GMAW com 62%;
- p) os custos de implementação do processo HLAW são elevados, sua tecnologia é recente e os fabricantes ainda são escassos. Os custos de implementação dos demais processos são mínimos;
- q) o *payback* da implementação do processo HLAW acontecerá em 12 anos, não justificando seu investimento;
- r) o chanfro de 45° influenciou na baixa produtividade e alto custo operacional das peças. Já o chanfro de 30° se mostrou uma mudança importante a ser realizada, contribuindo para a produtividade, sem perda de resistência da junta soldada.

O processo HLAW se mostrou a melhor opção a ser implementada para alcançar produtividade, entretanto com as falhas apresentadas ao longo do cordão de solda, ainda não foi considerado apto para a implementação. É um processo com potencial futuro, porém, precisa passar por mais rodadas de testes para acerto dos parâmetros de soldagem.

Por fim, para o atual momento, concluiu-se que o processo ideal para a implementação imediata é o processo GMAW com bisel de 30°, que não demonstrou nenhuma falha ao longo do trabalho, sua resistência mecânica atendeu ao necessário para o processo. Também apresentou boa produtividade perante os baixos custos operacionais e de implementação perante o processo FCAW.

5.1.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

Estudo comparativo da soldagem de juntas de topo de chapas grossas com o processo HLAW de potência de 10 kW ou maior e o processo SAW;

Avaliação do impacto do gás de proteção 100% CO_2 e das diferentes geometrias de biseis de uma junta de topo na produtividade da soldagem GMAW e(ou) FCAW;

Avaliação da soldagem HLAW em chapas de alta espessura sem chanfro e em um único passe;

Avaliação e parametrização do processo de soldagem Híbrido Laser+FCAW;

Estudo de avaliação das possíveis soluções para redução da martensita no processo HLAW.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M:2020**: Structural Welding Code - Steel. 22 ed. Miami: Aws, 2010. 536 p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **WELDING HANDBOOK VOL 1**: Welding Handbook. 9 ed. Miami: Aws, 2001. 985 p. Disponível em: https://blog.aku.edu.tr/cakmakkaya/files/2020/03/Welding_Handbook_WELDING_SCIENCE_AND_TEC.pdf. Acesso em: 10 abr. 2023.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.36/A5.36M:2016**: Specification for Carbon and Low-Alloy Steel Flux Cored Electrodes for Flux Cored Arc Welding and Metal Cored Electrodes for Gas Metal Arc Welding. 2 ed. Estados Unidos: Aws, 2016. 74 p. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/aws-a536-2016pdf-pdf-free.html>. Acesso em: 03 jun. 2023.

CAMPOS, Paulo Tancredo de. **Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW)**. 2005. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://archivum.grupomarista.org.br/pergamumweb/vinculos/tede/paulotancredodecampos.pdf>. Acesso em: 14 maio 2023.

DEARDEN, J. AND O'NEIL, H., "A Guide to the Selection and Welding of Low Alloy Structural Steels", Transactions of the Institute of Welding, Vol III, pp. 203-214, 1940.

DEEPAK, J.R.; RAJA, V.K. Bupesh; SOUNDARARAJAN, Hemanth; BHUMIREDDY, Prashant. Laser welding of ASTM Corten A588 grade steel - a case study. **Materials Today: Proceedings**, Chennai, India, v. 47, p. 4820-4826, 24 jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.052>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321044011?via%3Dihub>. Acesso em: 27 maio 2023.

DUTRA, Alexandre dos Santos; BOFF, Uilian; MARQUES, Angela Selau; SCHAEFFER, Lírio. Estudo analisa o uso de aços estruturais resistentes à corrosão atmosférica. **Corte & Conformação de Metais**: Matéria-prima, São Paulo, v. 93, n. -, p. 86-93, jan. 2013. -. Disponível em: <http://www.cbcm-metalforming.com/publicacoes/2013/Estudo%20analisa.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2023.

ESAB. **OK Aristorod 13.26**, Brasil, 2023. Disponível em: https://esab.com/br/sam_pt/products-solutions/filler-metals-pdf/?filename=mdm-productfamily-13451_low-alloy-wires&siteid=sam_pt&countryname=BRA&countrylocale=pt-br. Acesso em: 30 abr. 2023.

FARIAS, Túlio Albuquerque; SILVA, Ana Carla Santos da; FIGUEREDO, Erike Wilker Arruda; PEREIRA, Marcos; SILVA, Flávio José da. Efeito da Velocidade de Soldagem nas Características Geométricas e Microestruturais de Soldas por Arco Submerso em Tandem Arc. **Soldagem & Inspeção**, Recife, Pe, v. 26, p. 1-16, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si26.09>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/nQPJ4MLgZmcZRrfscwN9W8P/>. Acesso em: 04 jun. 2023.

FORTES, Cleber. **Metalurgia de Soldagem**. São Paulo: Esab, 2004. 96 p. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/mviniciusleite/esab-apostila-metalurgiadasoldagem>. Acesso em: 14 maio 2023.

GARCIA, Regina Paula; SCOTTI, Américo. Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular). **Consolda 2010**. Uberlândia, Minas Gerais, p. 1-10. 30 jun. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/TCQgB9vhLxwdnJg375T8nqD/?lang=pt>. Acesso em: 03 jun. 2023

GORNI, Antonio Augusto; SILVEIRA, José Herbert Dolabela da; REIS, Jackson Soares de Souza. Um panorama do desenvolvimento recente de chapas grossas e suas aplicações. **Corte & Conformação de Metais: Materiais**, São Paulo, v. 2, n. 19, p. 78-93, nov. 2006. Disponível em: http://www.gorni.eng.br/Gorni_CCM_Nov2006.pdf. Acesso em: 30 abr. 2023.

GOUVEIA, Ruimar Rubens de. **A influência da temperatura de interpasse na tenacidade do metal de solda na soldagem multipasse do aço inoxidável martensítico CA6NM pelo processo TIG**. 2008. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/17065/dissertacao_093_ruimar_rubens_de_gouveia.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 14 maio 2023.

KOU, Sindo. **WELDING METALLURGY**. 2. ed. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc, 2002. 468 p. Disponível em: <https://ia800208.us.archive.org/31/items/bzbzbzManTech/Manufacturing%20Technology/Welding%20Metallurgy%20e%20c.2003%20-%20Kou.pdf>. Acesso em: 14 maio 2023.

LAITILA, Juhani; LARKIOLA, Jari. Effect of enhanced cooling on mechanical properties of a multipass welded martensitic steel. **Welding In The World**. Genoa - Italy, p. 1-10. 3 jan. 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-018-00689-7#Sec1>. Acesso em: 20 maio 2023

LERMEN, Richard Thomas. Influência da velocidade de soldagem sobre as geometrias dos cordões de solda realizados através dos processos de soldagem FACW e soldagem híbrida (TIG/FACW). **Conference: Sief – Semana Internacional das Engenharias da Fabor. Horizontina**, p. 1-10. out. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334960703_Influencia_da_velocidade_de_soldagem_sobre_as_geometrias_dos_cordoes_de_solda_realizados_atraves_dos_processos_de_soldagem_FACW_e_soldagem_hibrida_TIGFACW. Acesso em: 03 jun. 2023.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. *E-book*. ISBN 9788595156067. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595156067/>. Acesso em: 13 mai. 2023.

PANNONI, F.D. ; HISTÓRIA, COMPORTAMENTO E USOS DOS AÇOS PATINÁVEIS NA ENGENHARIA ESTRUTURAL BRASILEIRA. In: 59o Congresso Anual da ABM -

Internacional, 2004, São Paulo. São Paulo: **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, 2004. p. 678-689. Disponível em: http://www.engmarcoantonio.com.br/cariboost_files/historia_comportamento_e_uso_dos_aços_patinaveis.pdf. Acesso em: 30 abr. 2023.

PETROBRAS - BR. N-133 - SC - 26: Soldagem. Brasil: ASTM. 2023. 102 p.

RODRIGUES, Clóvis Ribeiro; CERSOSIMO, Arno Giuseppe. **Soldagem na Indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: Programa Petrobras de Editoriaç o de Livros Didáticos, 2022. 901 p. Disponível em: http://fbts.org.br/PDF/Soldagem_na_industria_do_petroleo.pdf. Acesso em: 29 abr. 2023.

SILVA, Rafael Gomes Nunes; RODRIGUES, Max Baranenko; PEREIRA, Milton; FAES, Koen. Evaluation of high penetration hybrid laser-GMAW welding process productivity applied in the joining of thick plates. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 121, n. 5-6, p. 3271-3283, 20 jun. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-022-09516-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09516-2>. Acesso em: 04 jun. 2023.

THE JAPAN WELDING ENGINEERING SOCIETY (Japão). **Online calculation**: calculation menu of steel weldability and weld metal properties. 2023. Disponível em: https://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/index.jsp. Acesso em: 29 out. 2023.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. 506 p. Disponível em: https://www.academia.edu/11499301/Soldagem_processos_e_metalurgia_Wainer_Brandi. Acesso em: 14 maio 2023.

APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE MACROGRAFIA

Tabela 15 - Resultados medidos nas macrografias das 4 amostras.

AMOSTRA 1 (GMAW 30°)			AMOSTRA 2 (FCAW 30°)		
LR1	Largura do reforço (mm)	33,2	LR1	Largura do reforço (mm)	33,772
GS	Garganta de solda (mm)	22,4	GS	Garganta de solda (mm)	22,4
LR2	Largura da raiz (mm)	7,2	LR2	Largura da raiz (mm)	5,456
AR1	Altura reforço (mm)	3,3	AR1	Altura reforço (mm)	1,8
AR2	Altura raiz (mm)	1,615	AR2	Altura raiz (mm)	0,909
Média de Penetração (mm)		1,24	Média de Penetração (mm)		0,89
Média Tamanho ZTA (mm)		1,83	Média Tamanho ZTA (mm)		1,454
AMOSTRA 3 (FCAW 45°)			AMOSTRA 4 (HLAW)		
LR1	Largura do reforço (mm)	49,97	LC1	Largura do cordão 1 (mm)	9,5
GS	Garganta de solda (mm)	22,4	GS	Garganta de solda (mm)	22,4
LR2	Largura da raiz (mm)	10,22	GC1	Penetração cordão 1 (mm)	14,8
AR1	Altura reforço (mm)	4,523	GC2	Penetração cordão 2 (mm)	6,732
AR2	Altura raiz (mm)	1,9	LC2	Largura do cordão 2 (mm)	8,1
Média de Penetração (mm)		1,34	AC1	Altura cordão 1 (mm)	1,9
			AC2	Altura cordão 2 (mm)	1,9
Média Tamanho ZTA (mm)		3,27	Média de Penetração (mm)		2,15
			Média Tamanho ZTA (mm)		1,08

Fonte: O autor (2023)

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS NA EXECUÇÃO DOS PROCESSOS

Tabela 16 - Resultados obtidos durante monitoramento de cada processo.

Amostras	Amostra 1 (GMAW 30°)	Amostra 2 (FCAW 30°)	Amostra 3 (FCAW 45°)	Amostra 4 (HLAW)
Quantidade de Passes de Soldagem	17	15	31	2
Tempo total de de arco aberto (s)	1855	1418	2514	82,15
Tempo total de limpeza da soldagem (s)	936	1034	1848	0
Tempo total do processo (s)	2791	2452	4362	82,15
Tempo total do processo (h)	0,775277778	0,681111111	1,211666667	0,022819444
Consumo de arame (Kg)	1,6	1,3	2,5	0,28
Taxa de deposição de arame (Kg/h)	3,105121294	3,300423131	3,579952267	12,27023737
Vazão de Gás (l/min)	17	17	17	15
Consumo total de gás (l)	525,5833333	401,7666667	712,3	20,5375
Média de Velocidade de Soldagem (mm/min)	315	359	413	759
Aporte Térmico Médio entre Cordões (kJ/mm)	1,08	1,19	1,06	1,64
Temperatura de Pré-Aquecimento (°C)	22,5	19,5	27,1	23,5
Temperatura de Interpasse Média entre cordões (°C)	161	101	146	37
Custo material para realizar a junta	R\$ 93,14	R\$ 128,34	R\$ 245,31	R\$ 14,51
Empenamento (mm)	5,7585	6,5065	7,909	2,7665

Fonte: O autor (2023)

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA TRAÇÃO

Tabela 17 – Resumo do teste anova.

RESUMO	ESCOAMENTO	TRAÇÃO	ALONGAMENTO	Total
AMOSTRA 1 (GMAW 30°)				
Contagem	2	2	2	6
Soma	843,44	1185,63	48,61	2077,68
Média	421,72	592,815	24,305	346,28
Variância	524,2322	108,19205	1,63805	68182,25264
AMOSTRA 2 (FCAW 30°)				
Contagem	2	2	2	6
Soma	844,48	1194,45	46,28	2085,21
Média	422,24	597,225	23,14	347,535
Variância	706,1282	1,94045	0,2312	69404,87963
AMOSTRA 3 (FCAW 45°)				
Contagem	2	2	2	6
Soma	866,11	1216,02	39,61	2121,74
Média	433,055	608,01	19,805	353,6233333
Variância	5,28125	1,9208	0,31205	72984,16103
AMOSTRA 4 (HLAW)				
Contagem	2	2	2	6
Soma	833,06	1177,78	52,77	2063,61
Média	416,53	588,89	26,385	343,935
Variância	22,445	38,8962	0,16245	66456,69615
TOTAL				
Contagem	8	8	8	
Soma	3387,09	4773,88	187,27	
Média	423,38625	596,735	23,40875	
Variância	221,0361411	79,92882857	6,8264125	

Fonte: O autor (2023)

Tabela 18 – Resultado do teste anova.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	307,3353	3	102,4451	0,871020765	0,482980076	3,490294819
Colunas	1383292,743	2	691646,3714	5880,597036	1,1213E-18	3,885293835
Interações	435,824475	6	72,6374125	0,617586342	0,713209095	2,996120378
Dentro	1411,3799	12	117,6149917			
Total	1385447,283	23				

Fonte: O autor (2023)

APÊNDICE D – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE MICRODUREZA

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de microdureza Vickers.

	AMOSTRA 1 (GMAW 30°)	AMOSTRA 2 (FCAW 30°)	AMOSTRA 3 (FCAW 45°)	AMOSTRA 4 (HLAW)	AMOSTRA 5 (Metal Base)
Metal Base 1	202,5	170,4	171,4	170,0	163,3
	199,5	177,1	171,8	163,7	163,3
	205,5	176,1	172,3	173,7	163,3
ZTA 1	285,5	260,3	232,3	343,0	180,1
	277,7	248,5	233,8	366,5	180,1
	279,6	251,0	239,8	337,8	180,1
Zona Fundida	257,7	278,6	208,6	311,1	177,6
	260,3	271,1	241,4	414,3	177,6
	260,3	274,8	230,9	303,3	177,6
ZTA 2	281,6	240,6	236,8	320,5	188,9
	272,0	261,2	267,4	335,2	188,9
	272,0	245,3	250,2	325,2	188,9
Metal Base 2	208,0	170,9	176,1	176,6	169,1
	211,1	167,7	174,2	176,6	169,1
	210,5	176,1	178,1	176,1	169,1

Fonte: O autor (2023)

APÊNDICE E – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA COMPARAÇÕES PRODUTIVAS DOS PROCESSOS

Tabela 20 – Resumo do teste anova.

Anova: fator duplo sem repetição				
RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
Amostra 1	13	6646,643732	511,2802871	759248,8453
Amostra 2	13	5823,738201	447,9798616	565389,4778
Amostra 3	13	10078,75162	775,2885861	1804138,772
Amostra 4	13	1035,550557	79,65773514	42484,49993
Quantidade de Passes de Soldagem	4	65	16,25	140,9166667
Vazão de Gás (l/min)	4	66	16,5	1
Consumo total de gás (l)	4	1660,1875	415,046875	85463,91328
Temperatura de Pré-Aquecimento (°C)	4	92,6	23,15	9,823333333
Temperatura de Interpasse Média entre cordões (°C)	4	445	111,25	3100,25
Aporte Térmico Médio entre Cordões (kJ/mm)	4	4,97	1,2425	0,073491667
Média de Velocidade de Soldagem (mm/min)	4	1846	461,5	40942,33333
Taxa de deposição de arame (Kg/h)	4	22,25573406	5,563933516	20,02664326
Tempo total de de arco aberto (s)	4	5869,15	1467,2875	1055654,397
Tempo total de limpeza da soldagem (s)	4	3818	954,5	572025
Tempo total do processo (s)	4	9687,15	2421,7875	3125186,281
Tempo total do processo (h)	4	2,690875	0,67271875	0,241140917
Consumo de arame (Kg)	4	5,68	1,42	0,8376

Fonte: O autor (2023)

Tabela 21 – Resultado do teste anova.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	3206774,428	3	1068924,809	3,363496299	0,029095427	2,866265551
Colunas	26614278,29	12	2217856,524	6,978743636	2,546E-06	2,032703133
Erro	11440860,85	36	317801,6903			
Total	41261913,57	51				

Fonte: O autor (2023)

ANEXO B – CERTIFICADO DO ARAME SIDERWELD ER80-SG



MADE IN ITALY WELDING CONSUMABLES

SIDERWELD S.R.L.
 Cap. So. Euro 20.000,00 I.V.
 C.F. e P. IVA 02995640238
 email: info@siderweld.com

Società gestita con Sistema Qualità certificato UNI EN ISO 9001:15 dal TÜV Italia

INSPECTION CERTIFICATE (conforms to EN 10204:04 - 3.1) Certificato di Collaudo/Abnahmeprüfzeugnis/Certificat de Réception



N° Certificato / Certificate N°	000293	Data Cert. / Cert. Date	31/09/2021	Acquirente / Purchaser	T.M. Importacao e Comercio de Soldas Ltda	Destinatario / Addressee	Rua Angelo de Carl, 706 - St. Etienne
N° Fattura / Invoice N°	000008/21E	Data Fat. / Invoice Date		N° Ordine / Lot N°	210/1906	RAQ	Salvatore Caraso
N° Ordine / P.O. N°	PROFORMA 21/00007			Trasportatore / Carrier		Nave/Vessel	MSC DOMITILE
Nr. Container/Container No.	CAXU 64508613	Nr. Sigillo Vettore/Seal N°	CONT.FIDENZA 343668	Nr. Sigillo/Seal N°		Data Sped. / Shipping date	07/09/2021
				CAXIAS DO SUL RS (BRASIL) TAX ID -		CAXIAS DO SUL RS (BRASIL) TAX ID -	
				SIDERWELD S.R.L. - 02995640238 - C.F. e P. IVA 02995640238		SIDERWELD S.R.L. - 02995640238 - C.F. e P. IVA 02995640238	

ANALISI CHIMICA DEL FILO/CHEMICAL COMPOSITION OF THE WIRE

Nr. Colata/ Batch No.:	Normativa/ Standard:	Classificazione/ Classification:	Articolo / Product Number Descrizione / Description	Diam. (mm) Finish:	Finish:	Analisi Chimica / Chemical analysis: % p/p / wt.-%									
081879	EN ISO 14341-A AWS A5.28	G 50 4 M21 4Mo ER80S-D2	Customer P/N: 128 Mc Type: Winding:	1,20 COPPERED D-300 PRECISION	0,0870 As	Mn B	Si Sn	S Ca	P N	Cu* V	Mo Ti+Zr	Ni Ti	Cr Zr	Al	
081879	EN ISO 14341-A AWS A5.28	G 50 4 M21 4Mo ER80S-D2	Customer P/N: 128 Mc Type: Winding:	1,20 COPPERED D-300 PRECISION	0,0870 As	Mn B	Si Sn	S Ca	P N	Cu* V	Mo Ti+Zr	Ni Ti	Cr Zr	Al	
555109	EN ISO 14341-A AWS A5.28	G 46 4 M21 Z ER80S-G	Customer P/N: 128 RE Type: Winding:	1,20 COPPERED D-300 PRECISION	0,0710 As	Mn B	Si Sn	S Ca	P N	Cu* V	Mo Ti+Zr	Ni Ti	Cr Zr	Al	

Note/Remarks:
 Cu*: Cu di colata/Cu of heat. A questo valore deve essere addizionato l'eventuale rivestimento in rame del filo compresso tipicamente tra 0,5 e 0,15%. - To this value has to be added the copper coating on the wire, if present, typically within the range 0,05 - 0,15%.
 THE REPORT IS PRINTED BY COMPUTER AND NEEDS NO SIGNATURE - Questo certificato è stampato da computer e non necessita di firma

ANEXO C – CERTIFICADO DO ARAME ESAB E81T1-C1A2-W2

		CERTIFICADO DA QUALIDADE Quality Certificate / Certificado de Calidad Conforme ASMESFA5.01/2021 Programa(Schedule) F		
		Produto : OK TUBROD 81W 1,20 MM CPR 16KG <i>Product/Producto</i> Lote : VTX18T0489 <i>Heat Number/Produccion</i> Classificação : <i>Classification/Clasificación</i> AWS A5.29-10 ASME SFA5.29/ 2021 E81T1-W2M-H8 AWS A5.36-10 ASME SFA5.36/ 2021 E81T1-C1A2-W2		
		Data de Produção : 08.05.2023 <i>Date/Fecha de Produccion</i>		
Corpos de Prova de Metal Depositado <i>All-Weld Metal Test Assemblies/Corpos de Prova del Metal Depositado</i>				
Análise Química (%) <i>Chemical Analysis/Análisis Químico</i>				
C	Si	Mn	P	S
0,058	0,470	0,780	0,012	0,007
	Cr	Ni	Cu	
	0,550	0,520	0,470	
Propriedades Mecânicas Típicas <i>Typical Mechanical Properties / Propiedades Mecánicas Típicas</i>				
Resistência a Tração (MPA)/Tensile Strength/Resistencia a la Tracion			650	
Limite de Escoamento (MPA)/Yield Strength/Limite de Fluencia			580	
Alongamento (%)/Elongation/Alargamiento			25	
Teste de Impacto CHARPY-V (J)/Impact Test/Ensayo de Impacto			35	
Temperatura (°C)/Temperature/Temperatura			-30	
Teste de Filete <i>Filet Weld Test / Ensayo de Filete</i>				
ATENDE AOS REQUISITOS		SATISFY THE REQUIREMENTS		ATIENDE A LOS REQUISITOS
Qualidade Radiográfica <i>Radiographic Test/Calidad Radiográfica</i>				
ATENDE AOS REQUISITOS		SATISFY THE REQUIREMENTS		ATIENDE A LOS REQUISITOS
Observações <i>Observations/Observaciones</i>				
SOLDADO COM GAS 100%CO2WELDED WITH GAS 100%CO2SOLDADO COM GAS 100%CO2 H2 DIFUSIVEL MÁX 8ML/100G MAX DIFFUSIBLE H2 8ML/100G H2 DIFFUSIBLE MAX 8ML/100G				
 RONALD REQUEJO ESAB Indústria e Comércio Ltda. Controle de Qualidade Consumíveis <i>Quality Control / Control de la Calidad</i>				