

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

TÚLIO SIMPRINI PADULA

Influência da angulação da tocha no processo de soldagem MAG em juntas de
ângulo em T, utilizando aço microligado ASTM A572 grau 50

São Carlos

2023

TÚLIO SIMPRINI PADULA

Influência da angulação da tocha no processo de soldagem MAG em juntas de ângulo em T, utilizando aço microligado ASTM A572 grau 50

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Haroldo Cavalcanti Pinto

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S125i Simprini Padula, Túlio
Influência da angulação da tocha no processo de soldagem MAG em juntas de ângulo em T, utilizando aço microligado ASTM A572 grau 50 / Túlio Simprini Padula; orientador Haroldo Cavalcanti Pinto. São Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. MAG. 2. Ângulo da tocha. 3. Macrografia. 4. Micro dureza Vickers. 5. Cordão de solda. 6. Aço microligado. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato / Student: Túlio Simprini Padula
Título do TCC / Title:
Data de defesa / Date: 13/12/2023

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / Result
Professor Haroldo Cavalcanti Pinto (orientador)	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Professor Jéferson Aparecido Moreto	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Professor Mário Luiz Tronco	APROVADO
Instituição / Affiliation: EESC - SEM	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee



Professor Haroldo Cavalcanti Pinto

DEDICATÓRIA

*A minha mãe e ao meu pai pela
compreensão, carinho e apoio
incansável.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Haroldo Cavalcanti Pinto, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação.

Ao Engenheiro Mario Augusto Padula, pelo suporte técnico e desenvolvimento das amostras.

A Professora Doutora Rosimeire Simprini Padula, pelo suporte as regras e bons hábitos da escrita normativa.

EPÍGRAFE

“Metalurgia não é bruxaria, se fizer uma vez e der certo, pode fazer cem vezes da mesma maneira e também dará certo”

Rossitti, Sérgio M. (2023)

RESUMO

PADULA, T. S. Influência da angulação da tocha no processo de soldagem MAG em juntas de ângulo em T, utilizando aço microligado ASTM A572 grau 50. 2023. 42 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Este trabalho busca analisar a morfologia e dureza em cordões de solda de juntas em anguladas em T de aços microligados, alterando do ângulo da tocha. Neste estudo, procurou-se analisar a influência da angulação da tocha na morfologia e em relação à dureza das regiões oriundas da solda, cordão, metal base e zona termicamente afetada (ZTA). O material base utilizado foi o aço ASTM A572 grau 50, cujo limite de escoamento é 50 ksi, utilizado em aplicações estruturais, no formato de chapas de 100 mm por 150 mm. Foi utilizado o processo de soldagem Metal Active Gas (MAG), com 5% de O₂ e 95% de Ar, modificando os ângulos de trabalho e ângulo de avanço. Foram realizadas análise morfológica e imperfeições conforme norma ISO 5817:2014, nível de qualidade B, bem como análise de dureza conforme norma ISO 9015-2:2016, tomando como base a norma de qualificação de soldagem ISO 15614:2017. Como resultado, foi possível verificar que a angulação da tocha tem influência direta com defeitos de soldagem, como a presença de mordedura e falta de fusão. Com isso é possível concluir que a definição correta do ângulo de soldagem é essencial para uma maior robustez do processo.

Palavras-chave: MAG. Ângulo da tocha. Macrografia. Micro dureza Vickers. Cordão de solda. Aço microligado.

ABSTRACT

PADULA, T. S. **Influence of torch angle on the MAG welding process in tee joints using ASTM A572 grade 50 microalloyed steel.** 2023. 42 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

This work aims to analyze the morphology and hardness of weld seams in T-angle joints of microalloyed steels, by changing the torch angle. The aim of this study was to analyze the influence of the torch angle on the morphology and hardness of the weld, bead, base metal, and heat affected zone (HAZ) regions. The base material used was ASTM A572 grade 50 steel, whose yield strength is 50 ksi, used in structural applications in the 100 mm by 150 mm plates. We using metal active gas (MAG) welding process, with 5% O₂ and 95% Argon, modifying the work and travel angle. Morphological and imperfection analysis was carried out in accordance with ISO 5817:2014, quality level B, as well as microhardness analysis based on ISO 9015-2:2016 and welding qualification standard ISO 15614:2017. As a result, it was possible to verify that the torch angle has a direct influence on welding defects, such as the presence of bite and lack of fusion. The conclusion is that correct definition of the welding angle is therefore essential for a more robust process.

Keywords: MAG. Torch angle. Macrography. Microhardness Vickers. Welding bead. Microalloyed steel

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama de Ishikawa para trinca no processo de soldagem.....	17
Figura 2: Angulação de soldagem	21
Figura 3: Modelo de união das chapas	22
Figura 4: Montagem da bancada de solda do robô	22
Figura 5: Estereomicroscópio utilizado para análise de solda.....	24
Figura 6: Método de avaliação das amostras.....	24
Figura 7: Locais de análise de micro dureza	25
Figura 8: Medição de dureza esquematicamente.....	26
Figura 9: Durômetro utilizado para análise de micro dureza Vickers.....	26
Figura 10: Cordões de solda (Da esquerda para a direita, amostras 1 a 5).....	28
Figura 11: Macrografia das amostras	28
Figura 12: Detalhe falta de fusão na raiz na amostra 5	32
Figura 13: Relação de arco e tocha.....	32
Figura 14: Representação gráfica das análises de dureza.....	33
Figura 15: Média dureza média por região.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Carbono equivalente e soldabilidade	20
Tabela 2: Composição química do metal utilizado	21
Tabela 3: Angulação das amostras	23
Tabela 4: Dados de corrente e aporte térmico	27
Tabela 5: Dados macrográficos das amostras	30
Tabela 6: Análise de imperfeições.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MAG	–	Metal Active Gas
MIG	–	Metal Inerte Gas
GMAW	–	Gas Metal Arc Welding
SAW	–	Submerged Arc Welding
TIG	–	Tungsten Inert Gas
EB	–	Eletronic Beam
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
HV	–	Hardness Vickers
ISO	–	Internacional Organization of Standardization
DIN	–	Deutsches Institut für Normung
EN	–	European Committee for Standardization

LISTA DE SÍMBOLOS

ksi	–	Quilolibras por plegada quadrada
V	–	Volts
A	–	Amperes
Z	–	Perna
a	–	Garganta teórica
S	–	Garganta real
mm	–	Milímetros
s	–	Segundos
PV	–	Maior penetração da chapa vertical
PH	–	Maior penetração da chapa horizontal
C _{eq}	–	Carbono equivalente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos gerais	18
1.2 Objetivos específicos	18
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 Processos de soldagem.....	18
2.2 Processo MAG	18
2.3 Soldabilidade de aços microligados.....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1 Preparação das amostras	20
3.2 Análise macrográfica	23
3.3 Análise de dureza.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1 Análise macrográfica	27
4.2 Análise de micro dureza.....	32
5 CONCLUSÕES.....	36
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	37
Referências	38
Apêndice A – Detalhamento dos cordões de solda	41

1 INTRODUÇÃO

A união de metais por meio da soldagem é muito utilizada na indústria para redução de peso e aumento de resistência na união de juntas metálicas (LI et al., 2015). A tecnologia da soldagem está presente principalmente na indústria de transformação, ferroviária, rodoviária, construção civil entre outros (TEWARI; GUPTA; PRAKASH, 2010).

A soldagem MAG é um processo de soldagem que consiste no uso completo ou parcial de gases ativo (O_2 e CO_2) como gases protetivos. Este processo é bem versátil, devido ao controle de aporte de calor, velocidade de soldagem e taxa de deposição do arame (LERTORA; GAMBARO; CYPRES, 2011).

Na manufatura atual, há a necessidade de um olhar mais crítico sobre os métodos e conhecimentos tradicionais de fabricação, devido às novas tecnologias e materiais, se tornando dessa forma importante o controle de inúmeras técnicas e parâmetros de processos (LERTORA; GAMBARO; CYPRES, 2011).

Na área da soldagem, essa necessidade se transformou em equipamentos mais inteligentes, como o uso de robótica, sistemas de processamento e armazenamento de dados e equipamentos com mais funções e controle. Deve-se lembrar que toda essa tecnologia, que tem como base anos de estudos, tornando assim, os resultados atuais uma mistura entre arte e técnica (MAZZAFERRO, 2018).

Para se produzir solda de alta qualidade, são necessárias pessoas qualificadas, capazes de definir corretamente os parâmetros de soldagem. A qualidade de uma solda pode ser identificada principalmente pela microestrutura e correta geometria do cordão. A correta utilização de parâmetros reduz a variabilidade, aumentando a qualidade da solda e, conseqüentemente melhorando a qualidade do produto final (TEWARI; GUPTA; PRAKASH, 2010).

Os principais parâmetros responsáveis pelo controle da qualidade da solda são (TEWARI; GUPTA; PRAKASH, 2010):

Corrente, que define a taxa de fusão do eletrodo, influenciando diretamente na geometria e profundidade de fusão;

Tensão, diferença de potencial entre a poça de fusão e arame, influenciando em forma da zona de fusão e reforço da solda;

Velocidade de soldagem, que compreende a velocidade em que a tocha se desloca ao longo do cordão de solda, influenciado na forma do cordão.

Outro fator importante a ser controlado durante o processo de soldagem é a angulação da tocha, a qual tem influência em alguns fatores cruciais para a qualidade de solda, como macro e microestrutura e as propriedades mecânicas são fatores influenciados pelo ângulo da tocha. A variação na distribuição de calor é um fator importante na estrutura do cordão de solda (LI et al., 2015).

Esse trabalho visa compreender o comportamento de uma junta em ângulo (junta em T) de solda, utilizando um processo de soldagem MAG, bem como avaliar os possíveis defeitos de qualidade no cordão de solda e a influência na estrutura da união, causado pela influência da angulação da tocha.

A ideia do trabalho surgiu devido a uma falha durante o processo de soldagem de produtos em série em uma linha de montagem de uma indústria, onde foi identificado trinca em um dos produtos durante a macrografia de liberação de setup. Após a identificação do problema, seguiu-se com a análise, onde foi desenvolvido o diagrama de Ishikawa, como mostra a figura 1, a fim de encontrarmos uma causa raiz para o problema apresentado.

Figura 1: Diagrama de Ishikawa para trinca no processo de soldagem



Foi observado que nas peças trincadas a penetração em um dos componentes era muito maior que a do outro. A falha estava ligada a problemas com queda de energia, a célula de soldagem desligava, perdendo o referenciamento do robô, fazendo com que parâmetros de ajuste do robô tivessem que ser reconfigurados. Os parâmetros eram fixos para o processo, com exceção dos ângulos do robô, que eram ajustados manualmente, com auxílio de goniômetro. Por isso a relevância do estudo desse assunto, já que há poucos estudos na literatura que apoiem a importância da correta regulagem de parâmetros de soldagem.

1.1 Objetivos gerais

Estudo e análise de micro dureza e macrográfica sobre angulação de tocha e suas influências para o metal ASTM A572.

1.2 Objetivos específicos

Verificar defeitos de soldagem ligados a angulação de tocha, como mordedura, falta de fusão e elevada dureza na ZTA, causando dessa forma defeitos de qualidade, havendo a necessidade de alteração no processo de soldagem.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processos de soldagem

Os métodos de união de metais são conhecidos há milhares de anos, porém, na maior parte desse período o único método de soldagem era o caldeamento. No século XIX, tornou-se possível o armazenamento e a mistura de gases, o avanço tecnológico permitia que a eletricidade pudesse ser melhor controlada, permitindo que calor suficiente pudesse ser aplicado em peças metálicas mais rapidamente, tornando-se possível a formação de poças de fusão, que ao solidificar uniriam juntas metálicas (WEMAN, 2012).

Alguns dos principais processos de soldagem são: resistência, Gas Metal Arc Welding (GMAW), Submerged Arc Welding (SAW), Tungsten Inert Gas (TIG), Eletronic Beam (EB) e Laser (WEMAN, 2012). Para a elaboração deste trabalho, o processo de soldagem utilizado foi MAG, um dos processos GMAW.

2.2 Processo MAG

Nos tempos atuais o processo de soldagem mais comum nas indústrias é o processo GMAW, que inclui Metal Inert Gas (MIG), que utiliza principalmente como gases protetivos Argônio e Hélio, já o processo MAG, utiliza principalmente O₂ e CO₂ como gases protetivos (WEMAN, 2012).

Os processos GMAW são processos amplamente utilizados devido a sua flexibilidade em aplicações. O processo é capaz de unir chapas de espessura elevada, possuindo maior produtividade, quando comparado a outros processos de soldagem. A capacidade de unir grande parte dos metais mais comuns encontrados, como aço baixo carbono, baixa liga e inox, além de metais não ferrosos, como o níquel, alumínio, cobre e outras ligas metálicas (WEMAN, 2012).

As principais características de variação do processo de soldagem são os parâmetros de soldagem (WEMAN, 2012):

Tensão, parâmetro responsável principalmente pelo comprimento do arco, o que proporcionando variação na espessura do cordão de solda, tensão muito elevada proporciona um cordão mais espesso.

Espessura do arame, é comumente selecionado em função da corrente a ser utilizada, está principalmente relacionado a transferência de material, fios mais finos possuem uma transferência mais suave.

Corrente e velocidade do arame, é o principal parâmetro de soldagem e é indiretamente definida pela velocidade e diâmetro do arame. Esses parâmetros devem ser escolhidos de acordo com a espessura da chapa e velocidade de soldagem.

Stick-out, é a distância entre a ponta do bico de contato e a junta a ser soldada. Um stick-out muito pequeno aumenta as chances do bico de contato se unir ao cordão de solda. É comumente utilizado um stick-out de 10 à 15 vezes a espessura do arame.

Velocidade de soldagem, é a velocidade de deslocamento da tocha em relação à junta soldada, está relacionado ao formato e penetração do cordão de solda.

2.3 Soldabilidade de aços microligados

Aços microligados são aços que apresentam alta resistência mecânica e tenacidade, somado ao baixo teor de carbono, com adição de outros metais em menor proporção, até 0,1%. Suas características mecânicas são devido a granulação fina e a fenômenos precipitação, oriundos de seu processo de fabricação e a composição química. A elevada resistência permite construções mais leves, alguns aços dessa categoria são: ASTM A242, A588 e A572 (MODENESI, 2012).

A soldabilidade de aços microligados é semelhante ao aço de baixo carbono, no entanto, ainda pode ser melhoradas, reduzindo carbono enquanto é mantido sua resistência. Apesar disso, o rápido resfriamento da ZTA pode gerar zonas martensíticas de elevada dureza, obtendo uma menor tenacidade. A dureza da martensita está diretamente relacionada ao carbono do aço,

além disso, outros elementos podem influenciar diretamente na dureza, esse conceito é denominado carbono equivalente (C_{eq}), e pode ser calculado pela equação 1 (BAKER, 2016):

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

Esse cálculo permite estimar a sensibilidade a fissuras de hidrogênio na solda, dessa forma, quanto maior o C_{eq} , maior a suscetibilidade do aço a fissuras (MODENESI, 2012). A soldabilidade e a necessidade de pré-aquecimento para soldagem de um aço estão relacionados ao C_{eq} , a correlação pode ser observada na tabela 1.

Tabela 1: Carbono equivalente e soldabilidade

Carbono equivalente	Soldabilidade	Pré-aquecimento
Até 0,35	Excelente	Não é necessário
0,36 – 0,40	Muito boa	Recomendado
0,41 – 0,45	Boa	Necessário
0,46 – 0,50	Ok	Necessário
Acima de 0,51	Ruim	Necessário

Fonte: (ALHASSAN; BASHIRU, 2021).

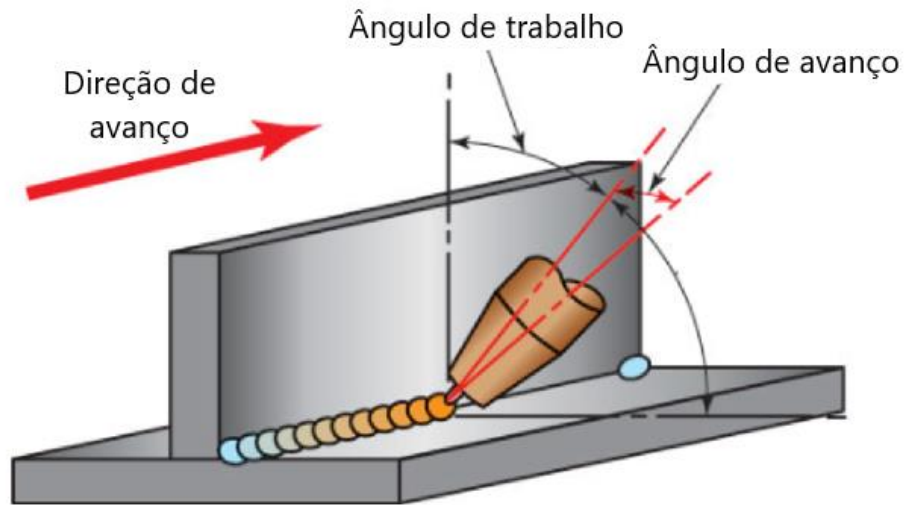
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Preparação das amostras

Para o início do estudo, é necessário compreender a tocha. Ela possui dois tipos de angulação: o ângulo de trabalho, que é o ângulo em relação a amostra, e o ângulo de avanço, angulação em relação ao cordão.

Estes ângulos podem ser observados na Figura 2.

Figura 2: Angulação de soldagem



Fonte: <http://www.halversoncts.com/910-welding-joints-in-the-horizontal-welding-position.html>

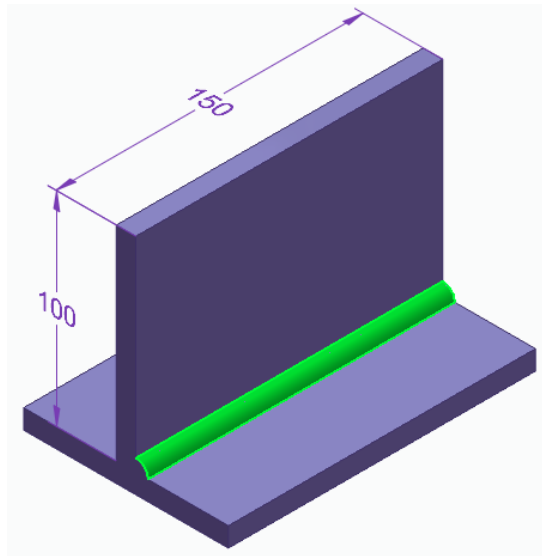
Para a realização do estudo, foi utilizada uma chapa de aço ASTM A572 grau 50, de espessura 3/8" (aproximadamente 9,52 mm). O metal utilizado tem composição química que pode ser observado na tabela 2 e possui $C_{eq} = 0,101$, calculado a partir da equação 1, obtendo assim uma boa soldabilidade do metal.

Tabela 2: Composição química do metal utilizado

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	N	B	Ca
Porcentagem	0,08	0,03	0,93	0,019	0,003	0,033	0,01	0,032	0,001	0,002	0,02	0,01	0,00	0,0052	0,0002	0,0026

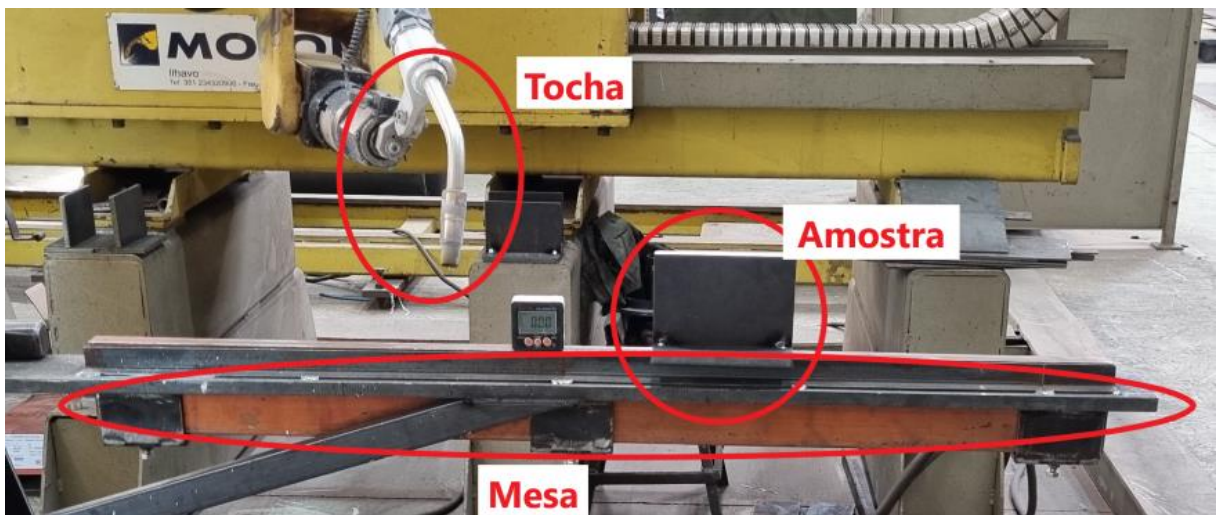
A chapa foi cortada, a partir de um processo de corte à plasma, obtendo pequenas chapas de dimensões 100 mm x 150 mm. As chapas de aço foram posicionadas, duas a duas, para que fosse possível formar uma junta T como mostra a Figura 3. Está destacado na figura a região de união, onde está localizado o cordão.

Figura 3: Modelo de união das chapas



Para unir as chapas, foi feito um processo de soldagem MAG, a qual foi feita utilizando um robô Fanuc, com fonte Kemppi e integrador Motofil, sobre uma mesa de cobre. Foi utilizado também, um grampo para fixação da amostra na mesa, a figura 4 destaca o conjunto montado para o processo de soldagem das amostras.

Figura 4: Montagem da bancada de solda do robô



Foi utilizado o arame Gerdau 70S6, de espessura 1,2 mm e uma mistura gasosa protetiva de 95% Ar + 5% O₂. A mistura gasosa foi escolhida a fim de conferir ao arco voltaico na soldagem a transferência por spray. A mistura apresenta uma maior chance de se ocorrer esse

tipo de arco, quando se comparado as misturas de CO₂. (PIRES; QUINTINO; MIRANDA, 2007).

Foi utilizado um programa de soldagem sinérgico, onde a tensão e outros parâmetros estão interligados, deste modo, para obtermos valores de potência e comprimento de arco otimizados (“KempArcTM”, [s.d.]). Os parâmetros foram definidos por testes realizados, anteriormente as amostras para o trabalho, parâmetros utilizados foram: stick-out, 18,5 mm; tensão, 30,7 V; velocidade de soldagem, 5 mm/s; velocidade do arame 9,2 m/min; além disso, definimos a polaridade do conjunto como, arame possuindo polo positivo e peça negativo

Inicialmente foi determinada uma angulação base de 45° ângulo de trabalho e 0° ângulo de deslocamento para o estudo, a partir dela, o ângulo foi alterado em 15° nos ângulos de avanço e de trabalho, desta forma, teremos cinco amostras, que estão descritas na tabela 3 com as respectivas angulações.

Tabela 3: Angulação das amostras

Amostra	Ângulo de trabalho	Ângulo de avanço
1	45°	0°
2	45°	-15°
3	45°	15°
4	30°	0°
5	60°	0°

Após a soldagem das peças, foram feitos dois cortes, no cordão da solda, desta forma foi possível a análise macroscópica e posterior teste de micro dureza. Para ambas as avaliações foi necessária a preparação das amostras.

3.2 Análise macrográfica

Para a primeira análise as amostras foram preparadas para macrografia, com o processo de desbaste da superfície lixando com uma lixa de granulação 60. Posteriormente foi utilizada lixas d’água de granulação 180 e 400. Após o lixamento foi feito um ataque químico com uma solução de nital 5%. Desta forma foi possível observar a zona fundida da solda, que se diferencia do metal base. Foi feita uma análise de medidas do cordão e uma análise visual de

defeitos, baseada em normas de defeitos DIN EN ISO 5817:2014 presentes em cordões de solda.

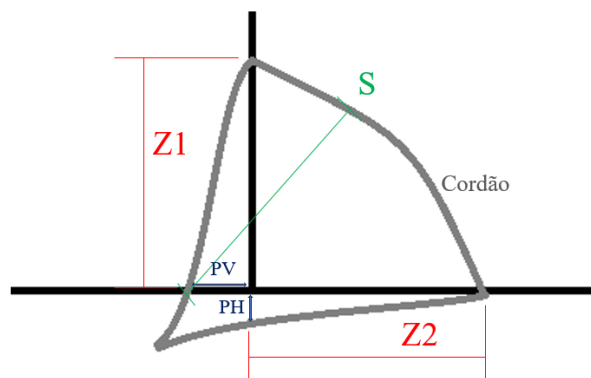
Para as análises, foi utilizado um microscópio Leica, assim como mostra a figura 5. Foram analisadas as regiões apresentadas na figura 6.

Figura 5: Estereomicroscópio utilizado para análise de solda



Fonte: <https://www.leica-microsystems.com/pt/produtos/microscopios-oticos/microscopios-estereos/p/leica-s9-e/>

Figura 6: Método de avaliação das amostras



Onde:

S = Distância entre raiz e superfície do cordão

Z1 e Z2 = Pernas

PV = Maior penetração na chapa vertical

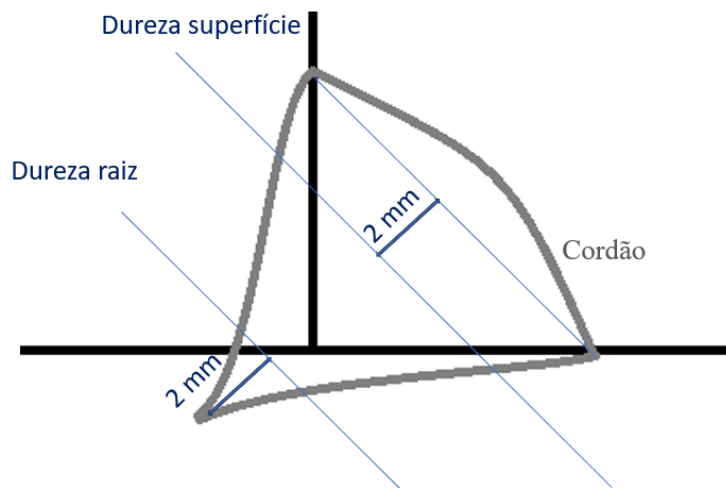
PH = Maior penetração na chapa horizontal

3.3 Análise de dureza

Para análise de dureza, foi feita a preparação das amostras, utilizando lixas de granulação 60, 180, 400, 600 e 1200. Após a preparação das amostras, foi feita a análise de micro dureza Vickers HV 1, ou seja, 1 kgf aplicado sobre as amostras

As amostras foram analisadas em duas regiões, como mostrado na figura 7. A primeira região a 2 mm de distância em relação a raiz da solda, e a outra a 2 mm em relação as margens da solda. A intenção foi analisar o comportamento da dureza no cordão, metal base e zona termicamente afetada, de cada amostra, a fim de verificar se a angulação pode modificar significativamente cada uma dessas regiões.

Figura 7: Locais de análise de micro dureza



Os pontos de medição de micro dureza distam 0,5 mm entre si. De acordo com a norma de análise de micro dureza ISO 9015-2:2016 para cálculo de dureza Vickers, utilizou-se a equação 2.1.

$$HV = 0,1891 * \frac{F}{d^2} \quad (2.1)$$

Onde:

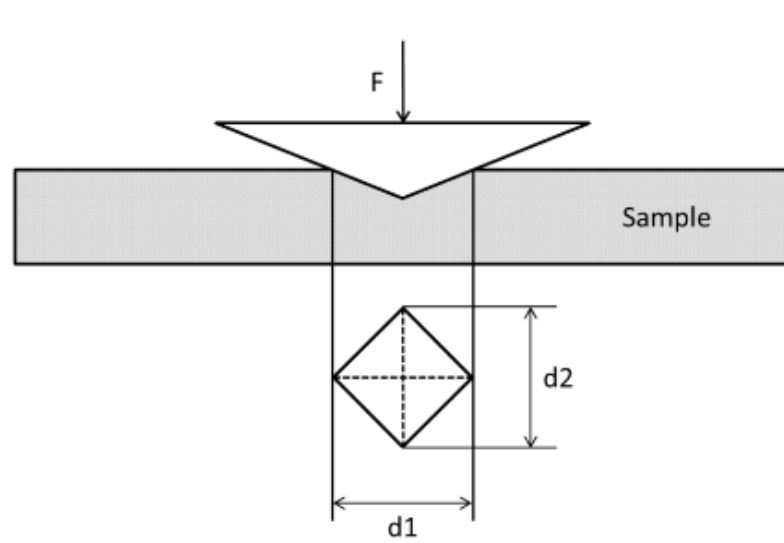
F = carga aplicada

d = dado pela equação 2.2.

$$d = \frac{d1 + d2}{2} \quad (2.2)$$

$d1$ e $d2$ podem ser obtidos na indentação do Durômetro na amostra. Pode-se observar, esquematicamente, na figura 8, a indentação e as medidas $d1$ e $d2$.

Figura 8: Medição de dureza esquematicamente



Fonte: <https://swissproficiency.com/en/product/vickers/>

Para realizar a análise, foi utilizado um durômetro Zwickroell, como mostrado na Figura 9. Assim, foi possível observar cada uma das indentações durante a análise de micro dureza.

Figura 9: Durômetro utilizado para análise de micro dureza Vickers



Fonte: <https://www.zwickroell.com/pt/produtos/maquinas-para-ensaios-de-dureza/medidores-de-dureza-vickers/#navigation-294>

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

É importante destacar que devido à sinergia da fonte de soldagem, a corrente não foi a mesma para todas as amostras, por isso é necessário iniciar a análise das amostras pelo processo de fabricação, com isso, teremos as correntes de cada uma das amostras, além do aporte térmico (energia fornecida pelo arco a cada uma das amostras soldadas, transformada em calor, capaz de fundir o material base). O aporte térmico pode ser obtido a partir da equação 3.

$$\text{Aporte térmico} \left(\frac{J}{mm} \right) = \frac{\text{Tensão}(V) \times \text{Corrente} (A)}{\text{Velocidade de avanço} \left(\frac{mm}{s} \right)} \quad (3)$$

Os dados de corrente e aporte térmico, assim como as respectivas amostras e seus ângulos estão evidenciados na tabela 3.

Tabela 4: Dados de corrente e aporte térmico

Amostra	Ângulo de trabalho	Ângulo de avanço	Corrente (A)	Aporte térmico (J/mm)
1	45°	0°	290	1780,6
2	45°	-15°	274	1682,36
3	45°	15°	276	1694,64
4	30°	0°	293	1799,02
5	60°	0°	293	1799,02

4.1 Análise macrográfica

Após a prévia análise do processo, foram analisados os cordões de solda das amostras. Os detalhes de cada cordão estão presentes no apêndice A. A visualização do cordão como um todo é mostrado na Figura 10.

Figura 10: Cordões de solda (Da esquerda para a direita, amostras 1 a 5)



Analisando visualmente os cordões de solda é possível evidenciar que os cordões das amostras 1, 2 e 5 são mais uniformes, além disso, há presença de mordeduras nas amostras 2, 3 e 4. O cordão da amostra 1 se mostra plano, em contrapartida, os outros cordões se mostram convexos indicando a presença de sobre metal.

Posterior a análise visual do cordão, foi realizada a análise macrográfico das juntas, a análise das amostras como mostra a Figura 11. Seguindo ordem crescente da amostra 1 até a amostra 5, foi avaliado cada cordão a partir do corte e macrografia. A imagem da esquerda se refere à região mais próxima ao início do cordão, enquanto a da direita ao fim do cordão.

Figura 11: Macrografia das amostras

Figura 11(a): Macrografia amostra 1 – esquerda

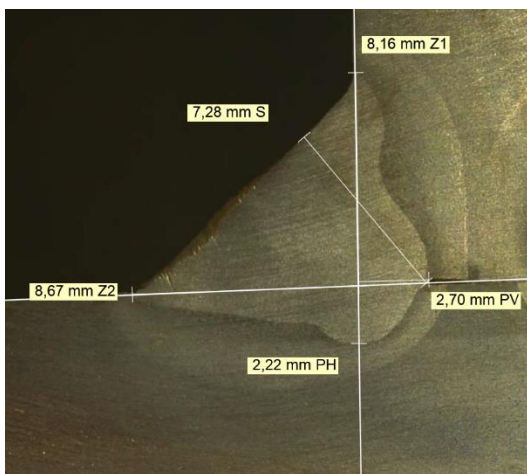


Figura 11(b): Macrografia amostra 1 - direita

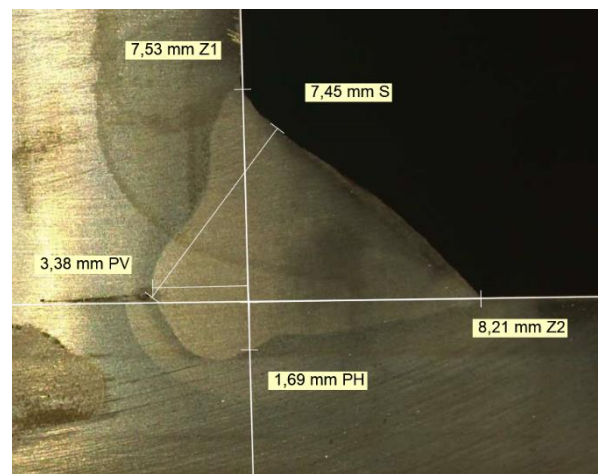


Figura 11(c): Macrografia amostra 2 – esquerda

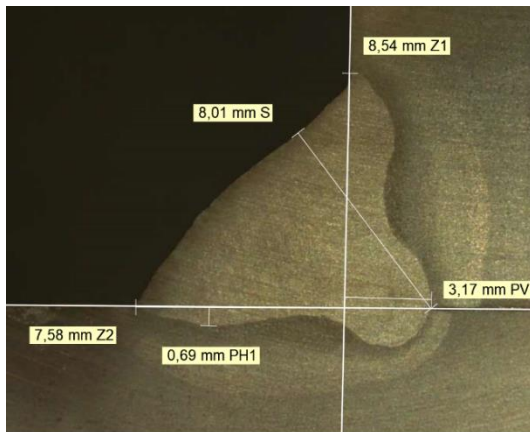


Figura 11(d): Macrografia amostra 2 – direita

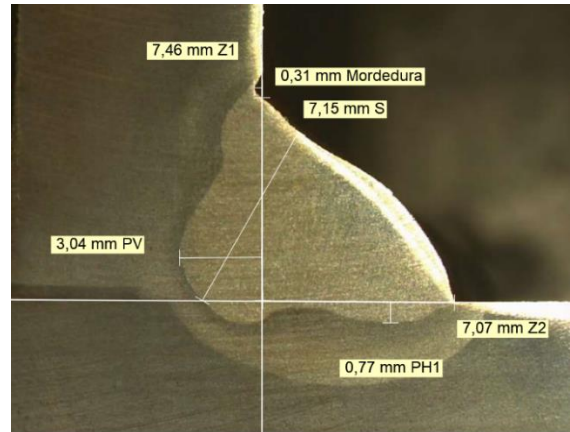


Figura 11(e): Macrografia amostra 3 – esquerda

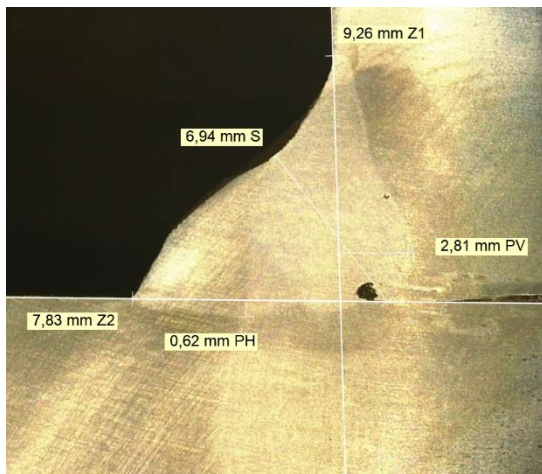


Figura 11(f): Macrografia amostra 3 – direita

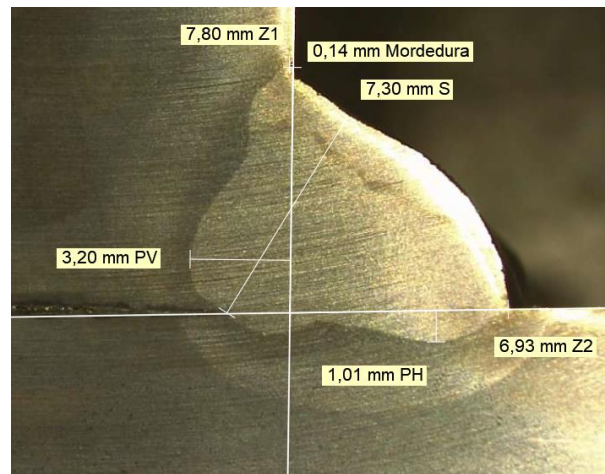


Figura 11(g): Macrografia amostra 4 – esquerda

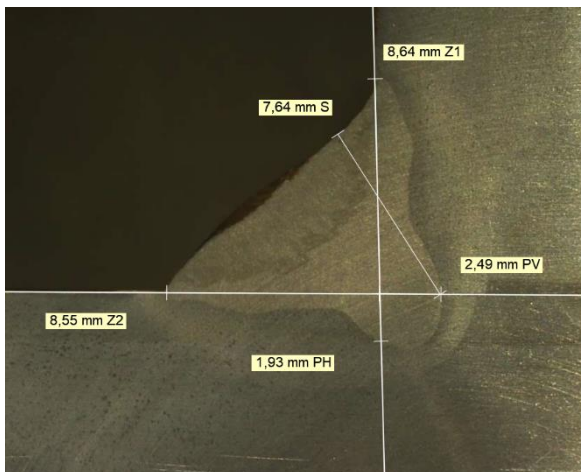


Figura 11(h): Macrografia amostra 4 - direita

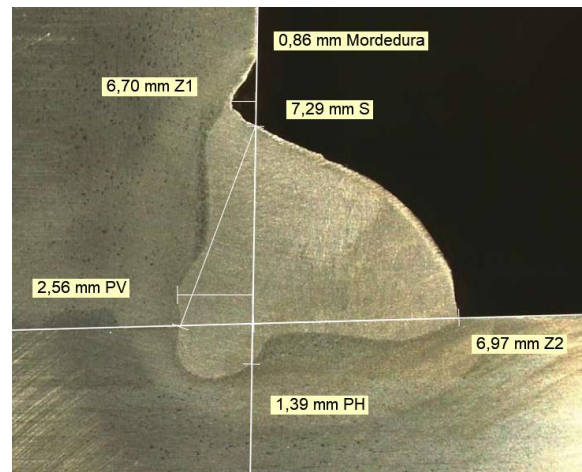


Figura 11(i): Macrografia amostra 5 – esquerda

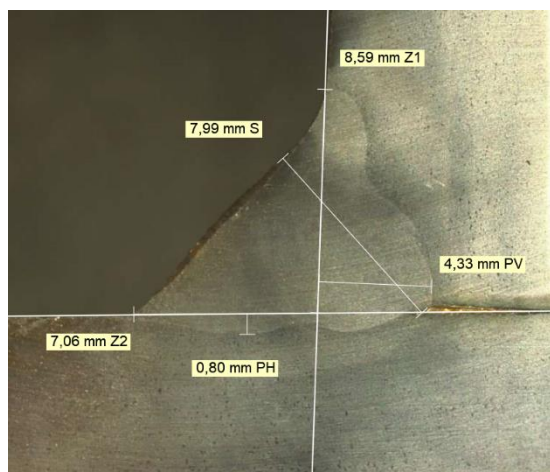
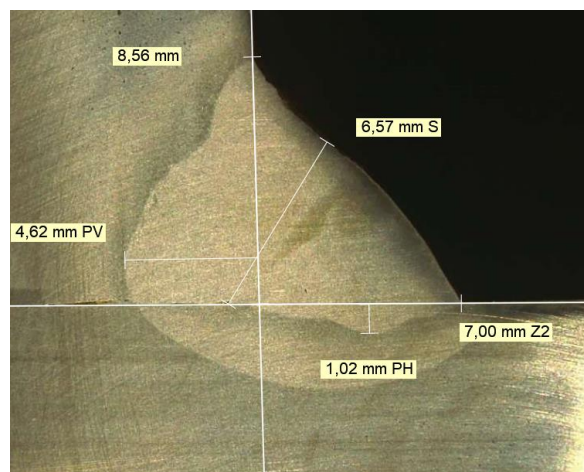


Figura 11(j): Macrografia amostra 5 – direita



A partir das medidas é possível analisar os diferentes cordões com mais detalhes. Na tabela 5 mostra os dados extraídos das figuras.

Tabela 5: Dados macrográficos das amostras

Amostras	1	2	3	4	5
Z ₁ Esquerda (mm)	8,16 ± 0,204	8,54 ± 0,214	9,26 ± 0,232	8,64 ± 0,216	8,59 ± 0,215
Z ₂ Esquerda (mm)	8,67 ± 0,217	7,58 ± 0,190	7,83 ± 0,196	8,55 ± 0,214	7,06 ± 0,177
PV Esquerda (mm)	2,70 ± 0,068	3,17 ± 0,079	2,81 ± 0,070	2,49 ± 0,062	4,33 ± 0,108
PH Esquerda (mm)	2,22 ± 0,056	0,69 ± 0,017	0,62 ± 0,016	1,93 ± 0,048	0,80 ± 0,020
S Esquerda (mm)	7,28 ± 0,182	8,01 ± 0,200	6,94 ± 0,174	7,64 ± 0,191	7,99 ± 0,200
Z ₁ Direita (mm)	7,53 ± 0,188	7,46 ± 0,187	7,80 ± 0,195	6,7 ± 0,168	8,56 ± 0,214
Z ₂ Direita (mm)	8,21 ± 0,205	7,07 ± 0,177	6,93 ± 0,173	6,97 ± 0,174	7,00 ± 0,175
PV Direita (mm)	3,38 ± 0,085	3,04 ± 0,076	3,20 ± 0,080	2,56 ± 0,064	4,62 ± 0,116
PH Direita (mm)	1,69 ± 0,042	0,77 ± 0,019	1,01 ± 0,025	1,39 ± 0,035	1,02 ± 0,026
S Direita (mm)	7,45 ± 0,186	7,15 ± 0,179	7,30 ± 0,183	7,29 ± 0,182	6,57 ± 0,164

A partir das informações da tabela 4, pode-se analisar os dados e imperfeições aparentes. De acordo com a norma ISO 5817:2014, será tomado como base, para análise da solda, o maior nível de qualidade, ou seja, o nível de qualidade B. A primeira análise será em relação à mordedura, que é calculada pela equação 4, onde h é a profundidade máxima do defeito e t é a espessura do material.

$$h \leq 0,05t \text{ (máximo } 0,5\text{mm)}$$

Fonte: ISO 5817:2014

(4)

Outro defeito que pode ser facilmente evidenciado é o excesso de assimetria no cordão de solda. Ele se dá pela diferença entre as pernas da solda Z1 e Z2. Essa diferença se dá pela equação 5.

$$|Z1 - Z2| \leq 1,5 + 0,105 x(\text{perna menor})$$

Fonte: ISO 5817:2014

(5)

A partir das equações 4 e 5, pode-se observar os defeitos nas amostras, avaliando se há a aprovação ou reprovação em uma produção em larga escala. Na tabela 6 apresenta as informações dos dados calculados para se avaliar a qualidade da solda das amostras.

Tabela 6: Análise de imperfeições

Amostra	Mordedura (máximo 0,476 mm)	Assimetria (Esquerda) (mm)	Assimetria (Direita) (mm)	Aprovação
1	0	0,51 ± 0,298	0,25 ± 0,279	Aprovado
2	0,31 ± 0,008	0,96 ± 0,285	0,55 ± 0,257	Aprovado
3	0,14 ± 0,004	1,43 ± 0,303	0,86 ± 0,261	Aprovado
4	0,86 ± 0,022	0,09 ± 0,304	0,94 ± 0,242	Reprovado
5	0	1,53 ± 0,278	0,57 ± 0,276	Aprovado

A partir da tabela 5, pode-se afirmar que a amostra 4 está reprovada em uma análise de imperfeições devido à profundidade da mordedura apresentada. Além disso, é possível observar, da Figura 11(j) falta de fusão na raiz, que pode ser vista em destaque na Figura 12, reprovando a peça. Dessa forma pode-se dizer que ambas as angulações, de 30° e 60° no ângulo de trabalho não são adequadas para utilização.

Para a amostra 4, a reprova se deu pela mordedura, que ocorre nesse caso devido à angulação da tocha e a aceleração da gravidade, fazendo com que o metal base funda e não haja deposição de arame na região, gerando o defeito, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 12: Detalhe falta de fusão na raiz na amostra 5

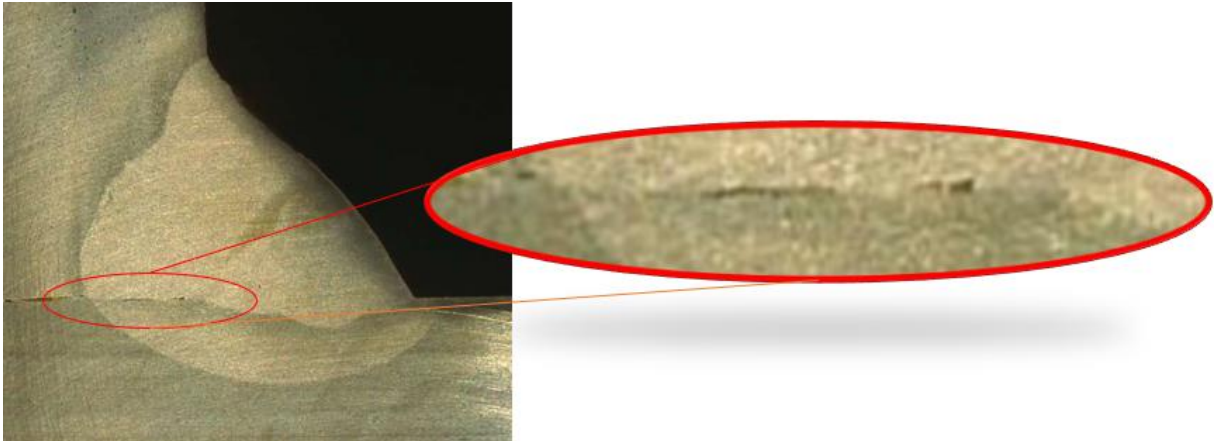
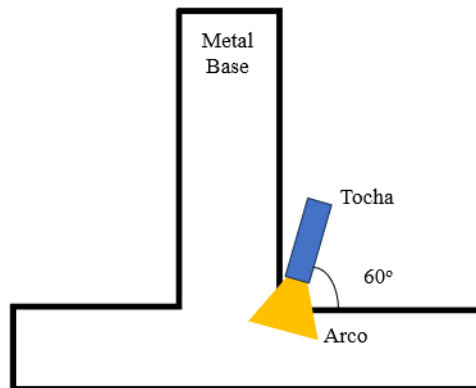


Figura 13: Relação de arco e tocha



4.2 Análise de micro dureza

Para a segunda etapa do estudo a dureza foi analisada em um dos lados, direita, em cada uma das amostras. Dessa forma, foi possível obter os dados de dureza, que mostra as medidas. Por fim, a partir dos dados coletados, pode-se plotar os gráficos de dureza em função dos pontos, a Figura 14 representa a plotagem dos pontos de micro dureza.

Figura 14: Representação gráfica das análises de dureza

Figura 14(a): Amostra 1

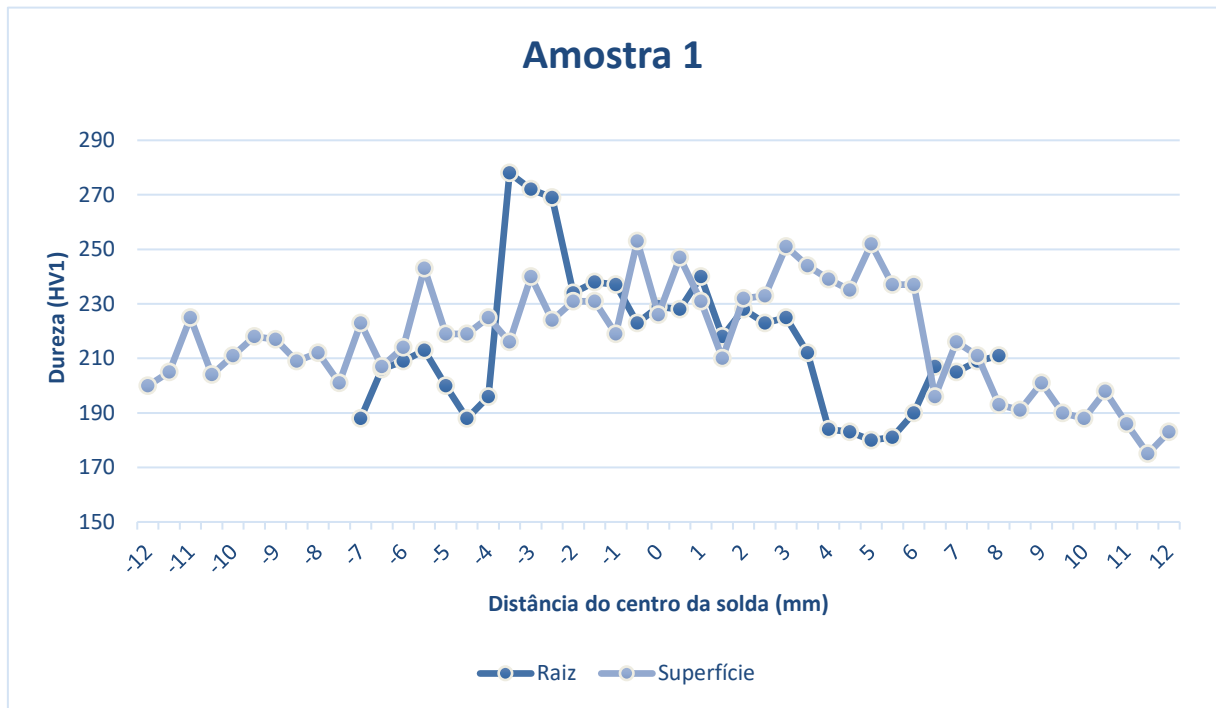


Figura 14(b): Amostra 2

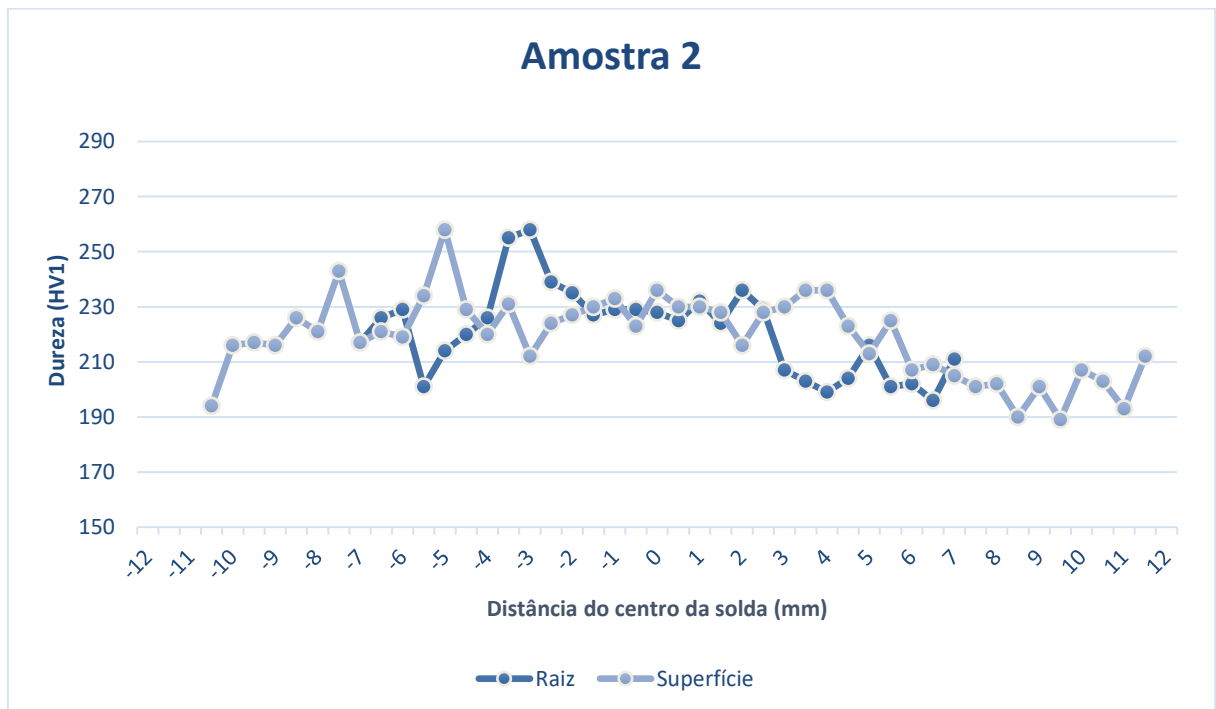


Figura 14(c): Amostra 3

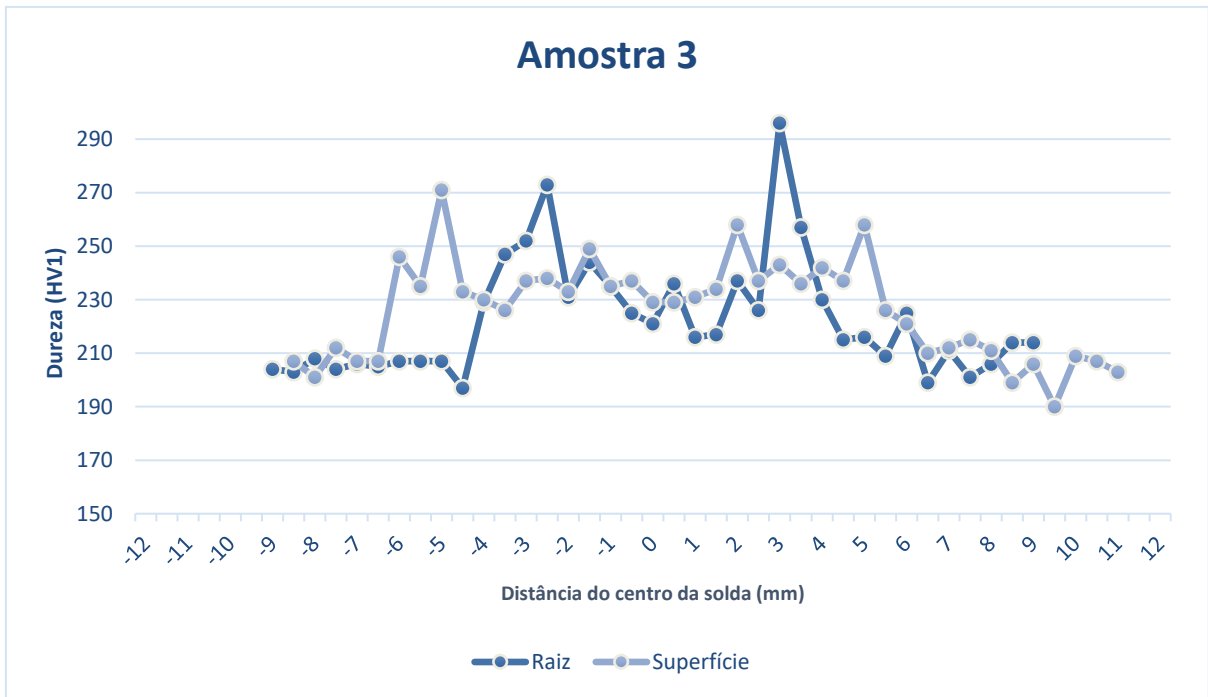


Figura 14(d): Amostra 4

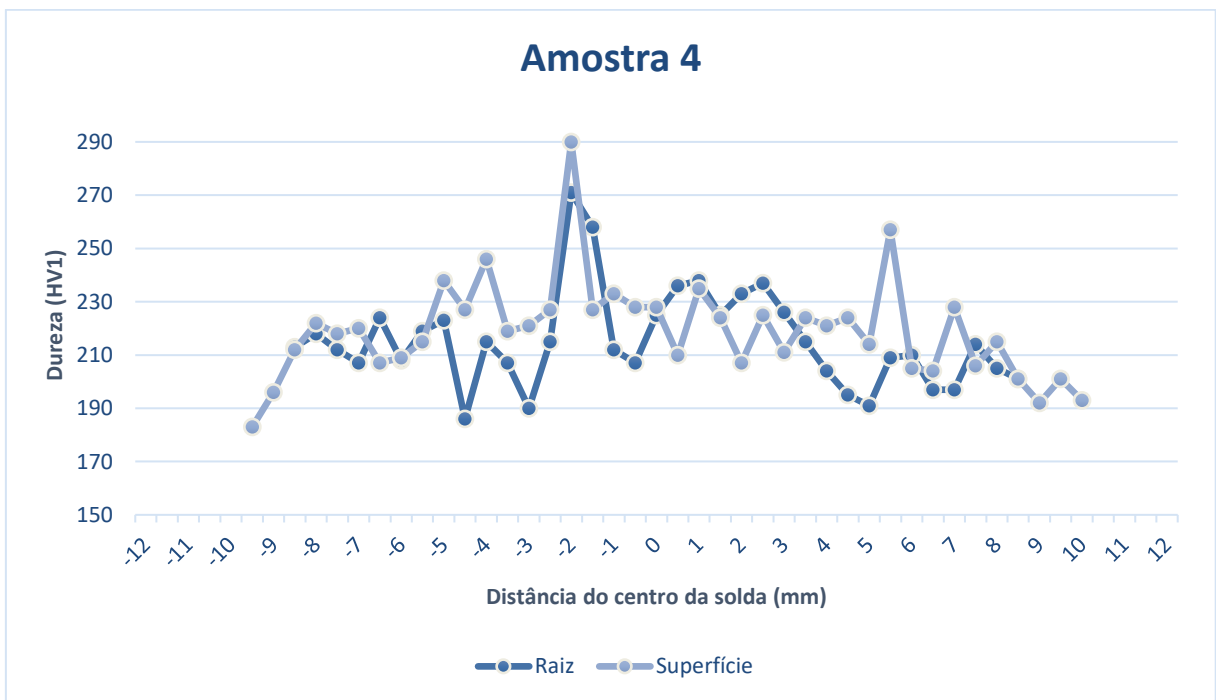
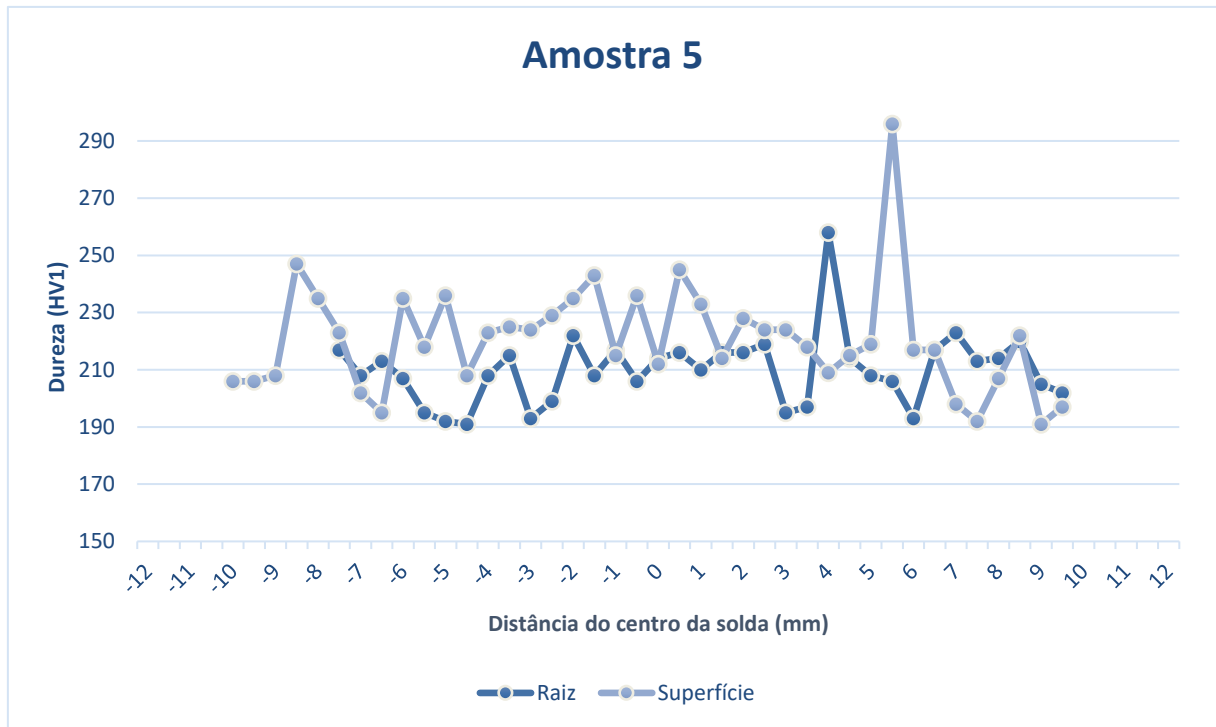


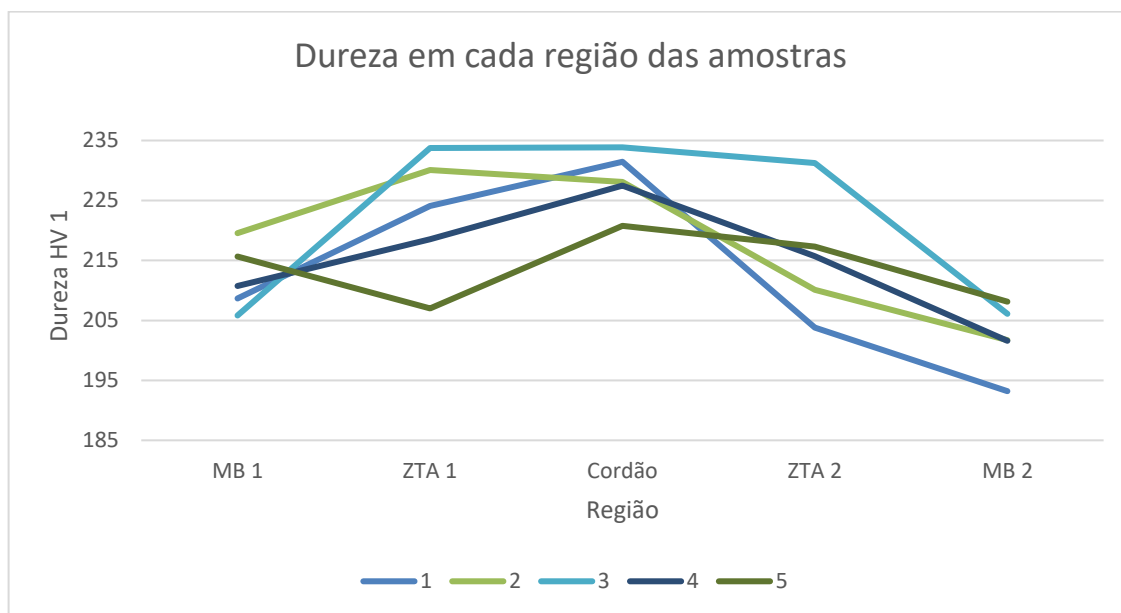
Figura 14(e): Amostra 5



Foi possível compilar os dados e verificar a média de dureza em cada uma das regiões para cada uma das cinco amostras, desse modo, para cada uma das amostras, existem cinco regiões, metal base inferior, ZTA inferior, cordão de solda, ZTA superior e metal base superior, sendo a região inferior o material de apoio, chapa horizontal e a região superior a chapa vertical.

Os dados contendo a média de dureza de cada uma das amostras e a média geral para as regiões são mostrados na Figura 15, para cada uma das medições, temos um erro de 11,5 HV.

Figura 15: Média dureza média por região



É possível observar pela figura 15 que a região de maior dureza das amostras é primariamente o cordão, porém, se forem consideradas as regiões da ZTA que margeiam o cordão, em alguns casos existem pontos onde a dureza é maior. Esses pontos devem ser controlados para que a solda possa ser qualificada de acordo com a norma ISO 15614-1:2017. Para o metal utilizado no trabalho ASTM A572 grau 50 permite uma dureza máxima de 380 HV.

Para a amostra 3, pode se observar na linha verde da figura 15 que há uma maior dureza na ZTA. Isso pode ser explicado pela incidência de calor no cordão. Como a tocha está angulada em direção ao cordão já formado, há um tempo de aquecimento maior no cordão, se comparado as outras amostra.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da angulação da tocha de soldagem sobre a morfologia do cordão de solda, bem como a dureza nas regiões afetadas pela solda. Considerando as características da junta, materiais utilizados, características dimensionais e ângulos empregados, é possível determinarmos algumas conclusões citadas a seguir.

Não é possível analisarmos a qualidade de uma solda apenas pela análise visual do cordão, sem a observação do interior do cordão. Para isso são necessários análises a partir de

outros testes, destrutivos, como análise macroscópica e teste de dureza, para o caso utilizado no trabalho, para avaliação do cordão, além de outros testes não destrutivos como ultrassonografia e radiografia. A angulação da tocha tem influência direta nos possíveis defeitos de soldagem, como mordedura, falta de fusão na raiz e dureza na ZTA.

A amostra 4, que apresentou maior de mordedura, acima do estipulado pela norma ISO 5817:2014, devido à angulação da tocha, 60° direcionada a chapa horizontal, e ao efeito da gravidade sobre o metal fundido, não havendo deposição de metal na região onde houve formação da mordedura.

Na amostra 5, onde ocorreu falta de fusão da raiz, a imperfeição ocorreu devido à angulação da tocha, 30°, direcionada a chapa vertical, fazendo com que o arco de soldagem não atingisse suficientemente a região da chapa horizontal, não havendo a fusão do metal base para que fosse possível fusão completa da raiz.

A angulação também influencia na dureza das regiões da solda, como mostrado no caso da amostra 3, onde houve um aumento de dureza, devido ao tempo de exposição ao calor, dado pela angulação de avanço, 15°, direcionada ao cordão de solda já formado, elevando a dureza da ZTA. Dessa forma, é necessário, principalmente para metais com alto C_{eq} , pré-aquecimento e para alguns casos resfriamento controlado, para que não haja excesso de dureza na ZTA, que pode ocasionar trincas de hidrogênio.

Deste modo concluímos que a melhor angulação de tocha para soldarmos duas chapas de aço ASTM A572 grau 50 é 45° referente ao ângulo de trabalho e 0° referente ao ângulo de deslocamento. Além disso, este estudo verificou a importância da definição correta do ângulo da tocha para a qualidade das peças produzidas no processo de soldagem MAG, visto os defeitos apresentados nesse trabalho, mordedura, falta de fusão e dureza na ZTA, que podem ocasionar falhas na utilização das peças soldadas.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Repetir testes para obter maior amostragem estatística.
2. Utilizar dois materiais diferentes para os testes.
3. Análise da influência mecânica das misturas dos gases protetivos.
4. Análise da influência mecânica sobre as peças com as angulações utilizadas.

Referências

9.10 Welding Joints in the Horizontal Welding Position. Disponível em:

<<http://www.halversoncts.com/910-welding-joints-in-the-horizontal-welding-position.html>>.

LERTORA, E.; GAMBARO, C.; CYPRES, P. **The influence of robotic MAG process welding parameters.** *Welding International*, 1 out. 2011.

KempArcTM. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://resources.userdoc.kemppi.com/manuals/kemparc-pulse-dt-om-pt.pdf>>.

PIRES, I.; QUINTINO, L.; MIRANDA, R. M. **Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate.** *Materials & Design*, v. 28, n. 5, p. 1623–1631, jan. 2007.

MAZZAFERRO, J. A. E. **Indústria 4.0 e a Qualidade da Informação. Soldagem & Inspeção**, v. 23, n. 1, p. 1–2, mar. 2018.

CHEN, J. et al. **Predicting the influence of groove angle on heat transfer and fluid flow for new gas metal arc welding processes.** *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 55, n. 1, p. 102–111, 15 jan. 2012.

LI, J. et al. **Effect of torch position and angle on welding quality and welding process stability in Pulse on Pulse MIG welding–brazing of aluminum alloy to stainless steel.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 84, n. 1-4, p. 705–716, 2 set. 2015.

TEWARI, S.; GUPTA, A.; PRAKASH, J. **EFFECT OF WELDING PARAMETERS ON THE WELDABILITY OF MATERIAL**, *International Journal of Engineering Science and Technology*. v. 2, n. 4, p. 512-516, 2010.

ISO. EN ISO 5817:2014. **Welding - Fusion-Welded Joints in Steel, Nickel, Titanium and Their Alloys (Beam Welding Excluded). Quality Levels for Imperfections.** *International*

Organization for Standardization; 2014

ISO. EN ISO 9015-2:2016. **Destructive tests on welds in metallic material - Hardness testing - Part 2: Microhardness testing of welding joints.** International Organization for Standardization; 2016

S9 Series. Disponível em: <<https://www.leica-microsystems.com/pt/produtos/microscopios-oticos/microscopios-estereos/p/leica-s9-e/>>. Acesso em: 11 nov. 2023.

Vickers Hardness Testing. Disponível em: <<https://swissproficiency.com/en/product/vickers/>>.

Durômetros Vickers. Disponível em: <<https://www.zwickroell.com/pt/produtos/maquinas-para-ensaios-de-dureza/medidores-de-dureza-vickers/#navigation-294>>. Acesso em: 11 nov. 2023.

ISO. EN ISO 15614-1:2017 **Specification and qualification of welding procedures for metallic materials -Welding procedure test - Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys.** International Organization for Standardization; 2017

The procedure handbook of arc welding. [s.l.] Cleveland Lincoln Electric, 1994.

Welding Handbook, Volume 1 - Welding Science and Technology (9th Edition). [s.l.] American Welding Society (AWS), 2001.

Welding Handbook, Volume 2 - Welding Processes, Part 1 (9th Edition). [s.l.] American Welding Society (AWS), 2001.

Welding Handbook, Volume 3 - Welding Processes, Part 3 (9th Edition). [s.l.] American Welding Society (AWS), 2001.

WEMAN, K. **Welding processes handbook**, Cambridge Woodhead, 2012.

BAKER, T. N. **Microalloyed steels.** *Ironmaking & Steelmaking*, v. 43, n. 4, p. 264–307, 24 mar. 2016.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012, Disponível em: <<https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>>. Acesso em: 25 dez. 2023

ALHASSAN, M.; BASHIRU, Y. **Carbon Equivalent Fundamentals in Evaluating the Weldability of Microalloy and Low Alloy Steels.** *World Journal of Engineering and Technology*, v. 09, n. 04, p. 782–792, 2021.

Apêndice A – Detalhamento dos cordões de solda



(a) Amostra 1



(b) Amostra 2



(c) Amostra 3



(d) Amostra 4



(e) Amostra 5