

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANNA LUIZA LEÃO COSTA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO E INSPEÇÃO EM JUNTA SOLDADA POR MEIO DE  
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: ULTRASSOM E LÍQUIDO PENETRANTE**

BELO HORIZONTE

2024

ANNA LUIZA LEÃO COSTA SILVA

CARACTERIZAÇÃO E INSPEÇÃO EM JUNTA SOLDADA POR MEIO DE ENSAIOS  
NÃO DESTRUTIVOS: ULTRASSOM E LÍQUIDO PENETRANTE

Trabalho de conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Ivan J. Santana

BELO HORIZONTE

2024

ANNA LUIZA LEÃO COSTA SILVA

CARACTERIZAÇÃO E INSPEÇÃO EM JUNTA SOLDADA POR MEIO DE ENSAIOS  
NÃO DESTRUTIVOS: ULTRASSOM E LÍQUIDO PENETRANTE

Trabalho de conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Ivan José de Santana, Doutor, CEFET-MG

---

Prof. Aline Silva Magalhães, Doutora, CEFET-MG

---

Bruno Cordeiro Silva, Doutor, CEFET-MG

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo.

Aos meus pais Luiz Fernando Silva e Wallana Leão Costa por todo o apoio ao longo dos meus anos de estudo e ao longo de todo o curso de Engenharia. Além de toda a orientação que me proporcionaram ao longo da vida.

Aos meus avós, Wallace Costa, Anna Lúcia Leão Costa, Antônio Luiz Silva e Saudalita Leite Perdigão por serem maravilhosos e sempre confiarem em mim, mesmo que, infelizmente, nem todos tiveram a oportunidade de me ver conquistar o tão sonhado diploma de Engenharia, estão em meu coração nesse momento.

À minha segunda mãe Nayara Leão Costa, por participar, com muito carinho, da minha criação e da minha vida acadêmica contribuindo imensamente na pessoa que me tornei.

Aos meus tios, de sangue e de coração, Wallace Costa Junior, Maria Tereza Lopes Costa e Eduardo Triginelli por todo amor e apoio concedido a mim.

À minha irmã, do coração, Danielle Catarino, por estar ao meu lado desde o momento em que nos conhecemos, pelas conversas, risadas, colos, conselhos e todos os momentos únicos que me ajudaram a chegar aonde estou e a vislumbrar um futuro melhor. E toda sua família por terem me adotado como uma segunda filha e cuidado de mim com todo o amor.

Aos meus irmãos Pedro Manuel Lourenço Silva e Antônio de Souza Silva, por me mostrarem o que é o amor incondicional.

Ao meu orientador Professor Dr. Ivan José de Santana por aceitar o meu pedido de orientação e por todo suporte com conversas e conselhos ao longo dos últimos anos.

Aos queridos Gilberto Caldeira Faria e Bruno Cordeiro Silva, por toda a atenção e apoio no desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso e por todas as conversas e conselhos que me ajudaram a desenvolver uma visão mais analítica e humana das diversas facetas da vida.

À Professora Dra. Aline Silva Magalhães por toda orientação durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e pela abordagem tranquilizadora durante as aulas.

Aos professores e técnicos do DEMAT que marcaram positivamente minha passagem desde meu ingresso no curso de Engenharia de Materiais e que me proporcionaram aulas e conversas enriquecedoras.

Ao CEFET-MG por toda a infraestrutura e qualidade de ensino que remonta à sua origem e que a cada ano contribui para a construção de uma parte da vida de cada aluno e funcionário que tenha passado por suas instalações.

O importante não é aquilo que fazem de nós, mas o que nós mesmos fazemos do que os outros fizeram de nós.

- Jean Paul Sartre

## RESUMO

A soldagem é uma das principais técnicas utilizadas na fabricação e reparo de estruturas metálicas no meio industrial. O presente estudo foca na análise da qualidade de soldas realizadas pelo processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), utilizando corpos de prova de aço AISI 1020. A qualidade das soldas desempenha um papel crucial na garantia da segurança e durabilidade das estruturas, tornando a identificação precisa de possíveis defeitos nas juntas soldadas uma exigência indispensável. Para tanto, foram realizados ensaios não destrutivos, incluindo ultrassom e líquido penetrante, com o objetivo de detectar imperfeições como poros, fissuras, mordeduras e falhas de penetração tanto na Zona Termicamente Afetada (ZTA) quanto na Zona Fundida (ZF). Além disso, foi realizada a análise macroscópica das juntas soldadas, possibilitando uma avaliação detalhada das descontinuidades. Os resultados obtidos ao longo da pesquisa permitiram considerar como eficazes os métodos de ensaio empregados na identificação de descontinuidades, ressaltando a importância dessas técnicas no controle de qualidade em processos de soldagem, reforçando, por tanto, a confiabilidade dos processos de soldagem que são essenciais para garantir a integridade estrutural de componentes metálicos.

Palavras-chave: Soldagem GMAW; Inspeção em soldagem; Metalografia; Ensaios não destrutivos; Ultrassom; Líquido Penetrante;

## ABSTRACT

Welding is one of the primary techniques used in the fabrication and repair of metal structures in the industrial sector. This study focuses on the analysis of weld quality performed using the Gas Metal Arc Welding (GMAW) process, utilizing AISI 1020 steel test specimens. The quality of welds plays a crucial role in ensuring the safety and durability of structures, making the precise identification of potential defects in welded joints an indispensable requirement.

To this end, non-destructive testing methods, including ultrasonic testing and liquid penetrant inspection, were conducted to detect imperfections such as pores, cracks, undercuts, and incomplete penetration in both the Heat-Affected Zone (HAZ) and the Melted Zone (WM). Additionally, macroscopic analysis of the welded joints was performed, allowing for a detailed evaluation of discontinuities. The results obtained throughout the research demonstrated the effectiveness of the testing methods employed in identifying discontinuities, highlighting the importance of these techniques in quality control within welding processes. This, in turn, reinforces the reliability of welding processes that are essential to ensure the structural integrity of metallic components.

Keywords: Welding. GMAW processes. Welding inspection. Non-destructive testing. Ultrasound. Penetrating liquid.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Terminologias da soldagem	18
Figura 3.2 Tipos de chanfro para cada posicionamento de junta a ser soldada	18
Figura 3.3 Identificação das partes do chanfro	19
Figura 3.4 Diagrama representativo do processo de soldagem GMAW	20
Figura 3.5 Zona Fundida (ZF) e Zona Termicamente Afetada (ZTA)	21
Figura 3.6 Modos de transferência metálica	22
Figura 3.7 Transferência por curto-circuito	22
Figura 3.8 Representação esquemática do equipamento de soldagem MIG/MAG	23
Figura 3.9 Descontinuidades diversas em solda em aço	24
Figura 3.11 Falta de fusão	25
Figura 3.12 Falta de penetração	26
Figura 3.14 Mordeduras	27
Figura 3.15 Trincas em junta soldada	27
Figura 3.16 Princípio do ensaio por líquido penetrante	29
Figura 3.17 Princípio do ensaio de ultrassom	30
Figura 3.18 Ensaio de ultrassom em juntas soldadas com transdutor angular	31
Figura 4.1 Fluxograma da metodologia	32
Figura 4.2 Serra Fita Horizontal FM-1600	33
Figura 4.3 Medição dos corpos de prova	33
Figura 4.4 Desenho técnico dos corpos de prova fresados	34
Figura 4.5 Fresadora Universal Clever FH-4	34
Figura 4.6 Corte dos ângulos de bixel	34
Figura 4.7 Máquina de solda - Power Wave® S350	35
Figura 4.8 Sistema mecanizado do processo GMAW	36
Figura 4.9 Lixamento das peças em lixa #600	37
Figura 4.10 Procedimento de ataque ácido com nital 5%	38
Figura 4.11 Transdutor reto sendo utilizado para realização de ensaio de ultrassom	38
Figura 4.12 Tela do equipamento de ultrassom	39
Figura 4.13 Medidor de espessura SONATEST BETAGAGE	39
Figura 5.1 Corpos de prova 01 e 02 com os chanfros preenchidos	41
Figura 5.2 Topo, faces (a) e (b) dos de prova 01 e 02 após fresamento	41
Figura 5.3 Oscilogramas de tensão (V) e corrente (I) do corpo de prova 01	42

Figura 5.4	Oscilogramas de tensão (V) e corrente (I) do corpo de prova 02	42
Figura 5.5	Foto macrografia do corpo de prova 07, face (b)	43
Figura 5.6	Aparelho de ultrassom com e sem a identificação de descontinuidade	44
Figura 5.7	Medidor de espessura identificando a profundidade referente à base da peça	44
Figura 5.8	Ensaio de líquido penetrante realizado no topo do corpo de prova 01	45
Figura 5.9	Ensaio de líquido penetrante realizado na face (a) do corpo de prova 01	45
Figura 5.10	Foto macrografia do corpo de prova 02, face (a)	46
Figura 5.13	Aparelho de ultrassom e de medição de espessura sem que nenhuma descontinuidade fosse identificada	46
Figura 5.14	Ensaio de líquido penetrante realizado no topo do corpo de prova 02	47
Figura 5.15	Ensaio de líquido penetrante realizado no topo do corpo de prova 02	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Composição aço AISI 1020	32
Tabela 4.2 Parâmetros de teste	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI - *American Iron and Steel Institute*

AWS – *American Welding Society*

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas

END – Ensaio Não Destrutivo

GMAW- *Gas Metal Arc Welding*

LP – Líquido Penetrante

MAG – *Metal Active Gas*

MB – Metal de base

MIG – *Metal Inerte Gas*

NBR NM – Norma Brasileira Norma Mercosul

VA – Velocidade de alimentação

VD – Velocidade de deslocamento

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona termicamente afetada

## LISTA DE SÍMBOLOS

° - Graus [ângulo]

°C - Graus Celsius

A - Ampères

Ar – Argônio

cm/min – centímetro por minuto

cm<sup>2</sup> - Centímetros quadrados

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

f – abertura da raiz

g/cm<sup>3</sup> - Gramas por centímetro cúbico

m - Metro

m<sup>2</sup> - Metro quadrado

mm - Milímetros

NBR NM - Norma brasileira norma Mercosul

S – Face da raiz ou nariz

T - Temperatura

t - Tempo [s]

V – Tensão do arco em Volts

W – Watts

$\alpha$  – ângulo do chanfro

$\beta$  – ângulo do bisel

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
<b>3.1.1</b>	<i>Soldagem</i>	<i>16</i>
<b>3.1.2</b>	<i>Riscos do processo</i>	<i>16</i>
<b>3.1.3</b>	<i>Arco Elétrico</i>	<i>17</i>
<b>3.1.4</b>	<i>Terminologias Usuais em Soldagem</i>	<i>17</i>
<b>3.2</b>	<b>Soldagem GMAW</b>	<b>19</b>
<b>3.2.1</b>	<i>Princípios da Técnica</i>	<i>19</i>
<b>3.2.2</b>	<i>Zona Fundida e Zona Termicamente Afetada</i>	<i>20</i>
<b>3.2.3</b>	<i>Transferência Metálica</i>	<i>21</i>
<b>3.2.4</b>	<i>Equipamentos e consumíveis</i>	<i>23</i>
<b>3.3</b>	<b>Descontinuidades em juntas soldadas</b>	<b>23</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Descontinuidades Dimensionais</i>	<i>24</i>
<b>3.3.2</b>	<i>Descontinuidades Estruturais</i>	<i>24</i>
<b>3.3.2.1</b>	<i>Porosidade</i>	<i>25</i>
<b>3.3.2.2</b>	<i>Falta de Fusão</i>	<i>25</i>
<b>3.3.2.3</b>	<i>Falta de Penetração</i>	<i>26</i>
<b>3.3.2.4</b>	<i>Mordedura</i>	<i>26</i>
<b>3.3.2.5</b>	<i>Trincas</i>	<i>27</i>
<b>3.3.3</b>	<i>Descontinuidades Decorrentes das Propriedades do Material</i>	<i>28</i>
<b>3.4</b>	<b>Inspeção em Juntas Soldadas</b>	<b>28</b>
<b>3.4.1</b>	<i>Ensaio Não Destrutivo</i>	<i>28</i>
<b>3.4.1.1</b>	<i>Líquido Penetrante</i>	<i>29</i>
<b>3.4.1.2</b>	<i>Ultrassom</i>	<i>30</i>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
<b>4.1.1</b>	<i>Confecção e preparação dos corpos de prova</i>	<i>33</i>
<b>4.1.2</b>	<i>Operação de soldagem e obtenção de dados</i>	<i>35</i>
<b>4.1.3</b>	<i>Preparação dos corpos de prova para realização dos ensaios</i>	<i>37</i>
<b>4.1.4</b>	<i>Análise Metalográfica - Macrografia</i>	<i>37</i>

4.1.5	<i>Ensaio de Ultrassom</i>	38
4.1.6	<i>Ensaio de Líquido Penetrante</i>	39
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	41
5.1	<b>Corpo de prova 01</b>	43
5.1.1	<i>Foto macrografia</i>	43
5.1.2	<i>Ultrassom e medição de espessura</i>	43
5.1.3	<i>Líquido Penetrante</i>	44
5.2	<b>Corpo de prova 02</b>	45
5.2.1	<i>Foto macrografia</i>	45
5.2.2	<i>Ultrassom e medição de espessura</i>	46
5.2.3	<i>Líquido penetrante</i>	47
6	<b>CONCLUSÃO</b>	48
	<b>REFERÊNCIAS</b>	49

## 1 INTRODUÇÃO

Existem diversas maneiras de unir materiais metálicos, sendo a soldagem mais relevante e comum na indústria moderna devido à sua ampla aplicabilidade, empregada em uma variedade de projetos, dos mais simples aos mais complexos. O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), é um dos mais difundidos no segmento, isso se deve à elevada taxa de ocupação do soldador e a possibilidade de automação do processo.

O processo é usado para unir materiais por meio de aquecimento e fusão, com foco em garantir a continuidade das propriedades entre peça e solda. Sendo realizado a partir de um arco elétrico gerado entre um eletrodo metálico sem revestimento e a peça. A proteção do arco e da poça de fusão contra contaminantes atmosféricos é garantida por um gás ou uma mistura de gases, ativos ou inertes.

Uma vez que a soldagem é empregada nos mais diversos processos industriais, muitas de suas aplicações são de elevada responsabilidade, tornando necessário o controle rigoroso de seus parâmetros e de sua qualidade. Para que seja possível garantir a qualidade e o cumprimento das normas na fabricação daquele produto, faz-se imprescindível a realização de inspeções nas juntas soldadas.

A inspeção a partir de ensaios não destrutivos (END) permite uma análise relativamente rápida e de baixo custo da junta soldada, quando comparada a outros métodos. Uma vantagem competitiva advinda da aplicação dos END's é a não inutilização da peça após a realização dos ensaios e a possibilidade de realizá-los em campo e ao longo da produção, entre as etapas, por exemplo, após cada cordão de solda depositado.

No presente trabalho, juntas soldadas pelo processo GMAW foram preparadas para análises metalográficas a fim de evidenciar o cordão de solda, facilitando, assim, a visualização de possíveis discontinuidades. Os END'S de líquido penetrante (LP) e ultrassom, foram aplicados aos corpos de prova e discontinuidades como poros, fissuras, mordedura e falta de penetração puderam ser detectados nas juntas soldadas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Caracterizar e inspecionar cordões de solda produzidos pelo processo GMAW mecanizado em corpo de provas de aço AISI 1020 com chanfros em “V”, avaliando o tipo de transferência metálica predominante no processo de soldagem, analisando os corpos de prova visualmente, realizando a análise metalográfica do material e aplicando as técnicas de ensaios não destrutivos, líquido penetrante e ultrassom.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o tipo de transferência metálica a partir de oscilogramas construídos com os sinais elétricos associados ao processo de soldagem;
- Avaliar os corpos de prova confeccionados pelo processo GMAW por meio de macrografia;
- Identificar e avaliar as discontinuidades dos corpos de prova a partir da aplicação das técnicas de ensaios não destrutivos, líquido penetrante e ultrassom.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1.1 Soldagem

A soldagem é um método de união de metais baseado em forças microscópicas, ou seja, a aproximação de átomos entre cada uma das peças ou com um metal de adição posicionado entre as elas. Esse contato leva à formação de ligações metálicas e, conseqüentemente, a união das peças (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Existem diversas definições para o termo soldagem, a mais completa do ponto de vista operacional e conceitual, é apresentada pela AWS (*American Welding Society*) como um “processo em que metais e não metais são unidos a fim de obter a coalescência localizada, sendo a união produzida por aquecimento, até temperatura adequada, podendo também ser utilizada pressão e material de adição para obter a união” (AWS, 1991, 955 p.).

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009) os métodos de soldagem podem ser divididos em dois grandes grupos.

- Soldagem por pressão (ou por deformação): nesse método as superfícies de contato são deformadas continuamente, permitindo a aproximação dos átomos e possibilitando a formação de ligações metálicas.
- Soldagem por fusão: esse método é baseado na aplicação localizada de calor na região desejada, até que seja alcançada a fusão do metal de adição e/ou da peça, os materiais são unidos e, após a solidificação, a solda é formada.

A AWS reconhece cerca de cem processos de soldagem por fusão, classificados pela fonte de calor utilizada, sendo a soldagem a arco elétrico a mais importante na indústria atual (MACHADO, 1996).

#### 3.1.2 Riscos do processo

Os riscos associados aos processos de soldagem são numerosos e podem causar danos físicos e materiais a equipamentos e instalação de acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009). A inalação de gases tóxicos, incêndios e explosões, choque elétrico e exposição à radiação ultravioleta são alguns dos principais riscos associados à prática. Contudo, os riscos podem ser evitados com a atenção rigorosa aos procedimentos de segurança.

A soldagem GMAW deve ser executada, preferencialmente, em ambientes secos e com a utilização de luvas e roupas de raspas de couro para que o choque elétrico seja evitado. A

retirada de qualquer material inflamável e a realização do processo em ambiente arejado é importante para evitar queimaduras e a inalação de gases tóxicos. Em situações em que o ambiente não tenha boa ventilação é importante que o operador faça uso de máscara de proteção com filtro de gás adequado para o processo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

### **3.1.3 Arco Elétrico**

O arco elétrico, usado nos processos de soldagem a arco, resulta de uma descarga elétrica entre dois eletrodos, com a queda de tensão ocorrendo principalmente na região do eletrodo negativo, conhecido como cátodo. O arco é estabelecido em um meio de gás ionizado, que conduz a corrente elétrica e gera calor pelo efeito Joule. As temperaturas geradas variam de 4.700 a 30.000 °C, fornecendo a energia térmica necessária para a fusão local dos materiais (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

O arco elétrico possui características vantajosas, como baixa concentração de energia necessária para a fusão, fácil controle, baixo custo relativo e risco moderado à saúde, o que o torna o método mais amplamente utilizado para a união de metais por fusão (MODENESI, 2011).

### **3.1.4 Terminologias Usuais em Soldagem**

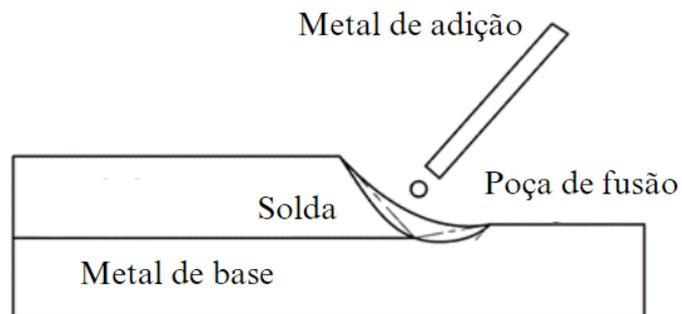
Sendo uma das técnicas mais utilizadas no processo de união de metais, a soldagem desempenha um papel de suma importância na fabricação e manutenção de estruturas metálicas nos mais variados setores, o processo de solda conta com os componentes apresentados na Figura 3.1 e descritos a seguir:

- Metal de base: material da peça, ou peças que estão sendo soldadas;
- Metal de adição: eletrodo consumível;
- Poça de fusão: região na qual o metal de base e de adição estão fundidos e, ao solidificarem, formarão a solda.

A soldagem pode ser realizada com a peça em diversos posicionamentos e a configuração escolhida influencia diretamente nas características finais da peça. A região em que as peças se encontram é chamada de junta e, para uma melhor acomodação do material de adição nas superfícies soldadas, são confeccionados chanfros nessa região. Os chanfros a serem confeccionados são escolhidos de acordo com o processo de soldagem que será utilizado, a espessura e as dimensões da peça. Sua principal função é garantir uma boa penetração da solda,

evitando descontinuidades relacionadas à falta de penetração. Os tipos de chanfros mais utilizados são relacionados aos tipos de juntas na Figura 3.2 (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

**Figura 3.1 Terminologias da soldagem**



Fonte: Adaptado de MARQUES, MODENESI e BRACARENSE 2009.

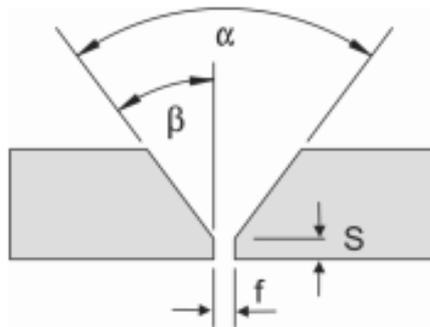
**Figura 3.2 Tipos de chanfro para cada posicionamento de junta a ser soldada**

Juntas de Topo		
Juntas de Canto		
Juntas de Aresta		
Juntas Sobrepostas		
Juntas de Ângulo		

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE 2009.

Cada região do chanfro possui uma nomenclatura específica, sendo elas a face da raiz ou nariz (S), a abertura da raiz (f), o ângulo de bisel ( $\beta$ ) e o ângulo do chanfro ( $\alpha$ ). A Figura 3.3 mostra o posicionamento de cada um desses itens (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

**Figura 3.3** Identificação das partes do chanfro



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE 2009.

## 3.2 Soldagem GMAW

### 3.2.1 Princípios da Técnica

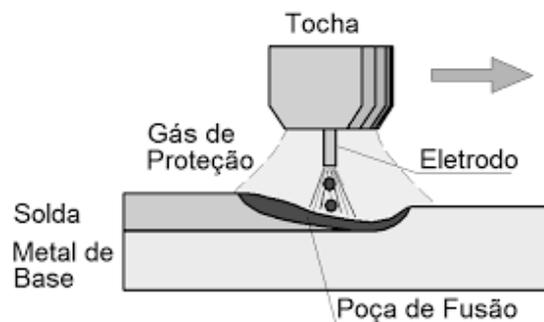
A soldagem por *Gas Metal Arc Welding* - GMAW tem o arco elétrico como fonte de calor. Dois tipos diferentes de corrente podem ser empregados para a soldagem MIG (*Metal Inert Gas*). A corrente contínua eletrodo positivo é a mais utilizada, mas a corrente contínua eletrodo negativo também pode ser aplicada em casos específicos, a segunda é menos utilizada por apresentar uma menor penetração e uma menor estabilidade (MACHADO, 1996).

O processo semiautomático, conta com um alimentador mecanizado para alimentação do arame, sendo o soldador responsável pelo início e interrupção do processo. O soldador pode também ser responsável pelo deslocamento do bocal do alimentador, mas, na maioria dos casos, o processo de movimentação também é mecanizado. A automatização de ambos os processos, alimentação do arame e deslocamento do bocal, visa garantir que o arco elétrico mantenha um tamanho relativamente padrão e que a velocidade de soldagem também se mantenha padronizada. O eletrodo metálico é consumível e não possui nenhum tipo de revestimento, apresentando diâmetro de 0,8 a 2,4mm. A proteção do arco elétrico e da poça de fusão é dada por um gás ou por uma mistura de gases, no caso do MIG um gás inerte, sendo comumente

usado o argônio, já na soldagem MAG (*Metal Active Gas*) são utilizados gases ativos (MODENESI, 2011).

A alta taxa de deposição e o alto fator de ocupação do soldador no processo GMAW o torna um processo de alta produtividade, sendo essa a principal vantagem desse tipo de soldagem sobre as demais. A variedade de materiais e de espessuras nas quais podem ser aplicados e a reduzida exigência de experiência do soldador, o que diminui o tempo de treinamento, são outras características que colocam o processo a frente dos demais. A Figura 3.4 apresenta uma representação do processo de soldagem GMAW (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009; WEINER, 2004).

**Figura 3.4 Diagrama representativo do processo de soldagem GMAW**



Fonte: Adaptado de MARQUES, MODENESI e BRACARENSE 2009.

Apesar de suas inúmeras vantagens, o processo de soldagem GMAW é sensível às mínimas variações dos parâmetros elétricos empregados, afetando a qualidade do cordão de solda produzido. Ou seja, o processo exige um rigoroso método de determinação e controle dos parâmetros de soldagem para garantir a excelência dos cordões de solda, uma vez que parâmetros inadequados estão diretamente associados a descontinuidades na junta soldada. O preço dos equipamentos, a necessidade de manutenções frequentes e a limitada variedade de consumíveis são algumas das desvantagens da soldagem por GMAW (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009; WEINER, 2004).

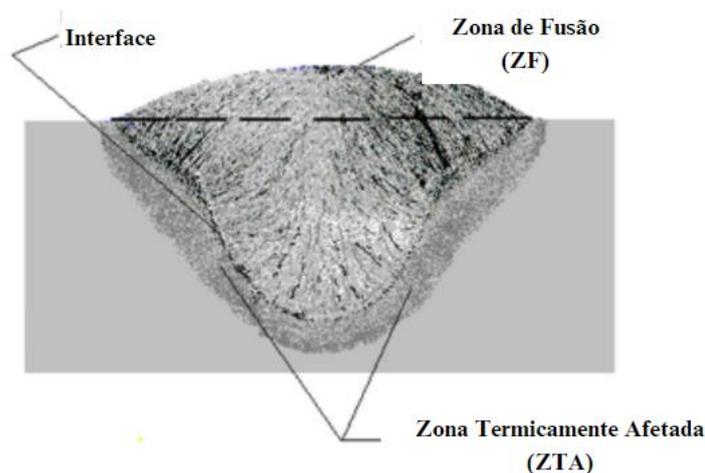
### **3.2.2 Zona Fundida e Zona Termicamente Afetada**

É denominada junta a região da peça em que a soldagem será aplicada, essa região pode ser dividida em duas principais partes, sendo elas a zona fundida (ZF) e a zona termicamente afetada (ZTA). As descontinuidades decorrentes do processo de soldagem podem ser

encontradas nessas duas áreas (MACHADO, 1996).

A ZF consiste na mistura homogênea (quando observado macroscopicamente) do metal base, peça, e do metal de adição, eletrodo, e pode ser constituída por um ou mais passes, também chamados de cordões de solda. Já a ZTA se caracteriza pela região em que podem ser observadas alterações alotrópicas importantes devido à exposição à elevadas temperaturas, mesmo que não tenha havido a fusão do metal nessa região. Dentre essas alterações estão crescimento de grão e mudanças de fase. As zonas referidas e a interface presente entre elas podem ser observadas na Figura 3.5 (MACHADO, 1996).

**Figura 3.5 Zona Fundida (ZF) e Zona Termicamente Afetada (ZTA)**



Fonte: Adaptado de FELIZARDO, 2016.

### **3.2.3 Transferência Metálica**

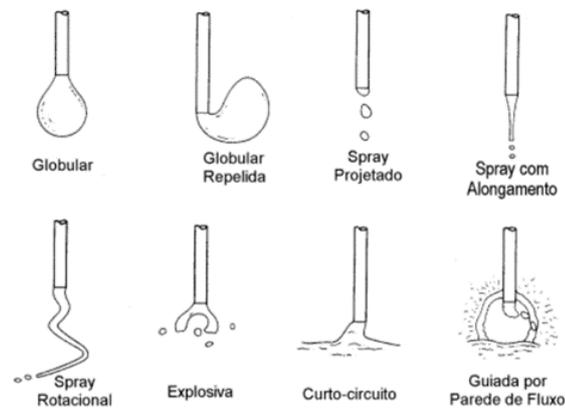
Na soldagem por arco elétrico, principalmente com eletrodos consumíveis, a maneira pela qual o metal fundido será transferido entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão é um parâmetro de suma importância. O tipo de transferência predominante no processo afeta diretamente as propriedades finais da junta soldada, tornando essencialmente necessário o seu controle (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009; MODENESI, 2012).

No processo de soldagem GMAW a transferência metálica ocorre de três principais maneiras, por curto-circuito, por transferência globular e por transferência por “spray” ou aerossol. A Figura 3.6 demonstra as principais formas de transferência metálica nos processos de soldagem MIG/MAG (MODENESI, 2012).

A transferência metálica por curto-circuito é a mais eficiente e a sua ocorrência deve ser

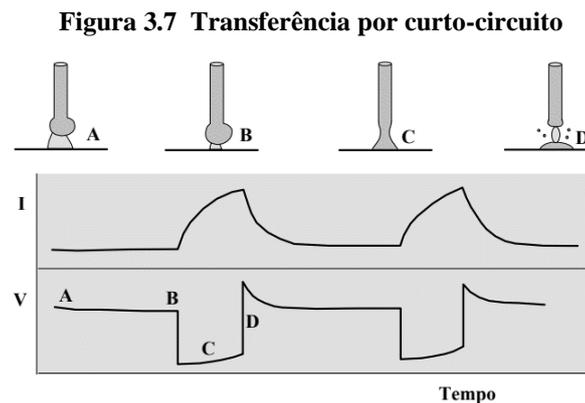
priorizada no processo GMAW. Esse método de transferência é favorecido quando o arco elétrico formado entre o eletrodo e a peça a ser soldada apresenta um comprimento reduzido. Para que esse tipo de transferência seja obtida é necessário que o a soldagem seja realizada a baixas frequências e a baixas correntes, o eletrodo toca de maneira intermitente a poça de fusão, tornando-se possível a ocorrência de um curto-circuito, ou seja, o arco elétrico é temporariamente extinto. Nesse momento a corrente aumenta subitamente aquecendo o eletrodo por efeito Joule e promovendo sua fusão, quando o metal fundido é transferido para a poça de fusão o curto-circuito é rompido e o arco é restabelecido (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

**Figura 3.6 Modos de transferência metálica**



Fonte: MODENESI, 2001.

A Figura 3.7 associa os momentos em que há presença do arco, A e B, o momento em que o curto-circuito é estabelecido, C, e a reignição do arco em D, com os oscilogramas de corrente e tensão (MODENESI, 2012).



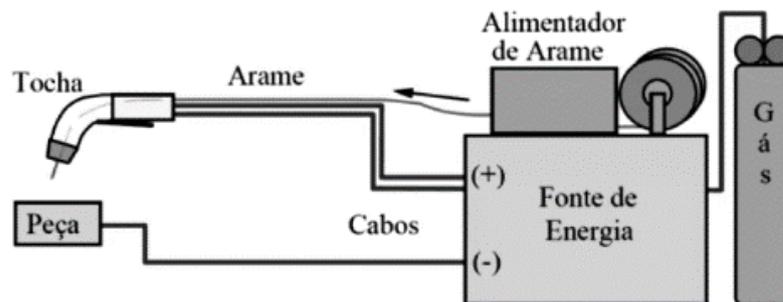
Fonte: MODENESI, 2001

A transferência metálica por curto-circuito é a mais comumente usada na soldagem GMAW uma vez que garante uma melhor estabilidade do arco, essencial para trabalhos de precisão, gera uma quantidade reduzida de respingos, resultando em soldas mais limpas e com menor necessidade de limpeza após a soldagem, possui um menor risco de distorção da peça, pela menor geração de calor durante o processo e permite que a soldagem seja realizada em diversas posições (LINCOLN, 1940).

### 3.2.4 Equipamentos e consumíveis

Para a realização de uma soldagem GMAW faz necessário o uso de uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás protetor, além de cabos e mangueiras. Posicionadores e sistemas de movimentação mecanizada também podem ser utilizados no processo. A Figura 3.8 apresenta o equipamento básico para a soldagem MIG/MAG (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Figura 3.8 Representação esquemática do equipamento de soldagem MIG/MAG



Fonte: Adaptado de MARQUES et al., 2009

Os arames para soldagem GMAW são metálicos e possuem dimensões, composição química, dureza e condição superficial bem controlada. Já os gases de proteção podem ser inertes ou ativos, além de poderem ser uma mistura de ambos, e influenciam diretamente nas características do arco elétrico e da solda (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

### 3.3 Descontinuidades em juntas soldadas

São consideradas descontinuidades qualquer interrupção da estrutura habitual de uma junta

soldada, ou seja, a falta de homogeneidade das características químicas, metalúrgicas, mecânicas ou físicas daquela região. Defeito e descontinuidade têm significados diferentes, para que um defeito seja identificado, a descontinuidade deve ser analisada e comparada a um critério de aceitação, normalmente estabelecido por uma norma. A partir do momento que se identifica uma descontinuidade que leve a peça a não atender os critérios utilizados, passa-se a ser considerada um defeito. As descontinuidades comuns em soldas podem ser divididas a partir de três critérios, sendo eles: descontinuidades dimensionais, estruturais e aquelas decorrentes de propriedades inadequadas do material (MODENESI, 2001).

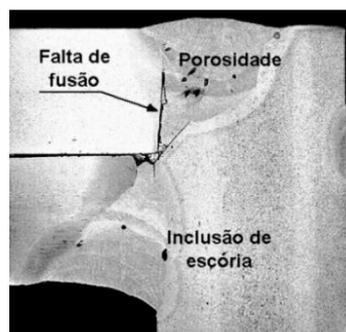
### **3.3.1 Descontinuidades Dimensionais**

Qualquer variação, na forma ou na dimensão de um material, decorrente do processo de soldagem pode ser considerado uma descontinuidade. A principal descontinuidade dimensional é a distorção, decorrente das deformações térmicas sofridas pelo material no momento do aquecimento, e pode ser controlada com um projeto adequado, que mostre claramente o tipo de chanfro que deve ser feito na peça e a técnica de deposição que deve ser aplicada (MODENESI, 2001).

### **3.3.2 Descontinuidades Estruturais**

As juntas soldadas podem apresentar diversos tipos de descontinuidades estruturais, que afetam as propriedades da solda, e conseqüentemente a estabilidade da peça. Dada a sua influência na estrutura final é de suma importância que essas sejam identificadas, para que o processo seja melhorado e que qualquer defeito decorrente da descontinuidade seja erradicado. A Figura 3.9 apresenta diferentes descontinuidades estruturais (MODENESI, 2001).

**Figura 3.9 Descontinuidades diversas em solda em aço**



Fonte: MODENESI, 2001.

### 3.3.2.1 Porosidade

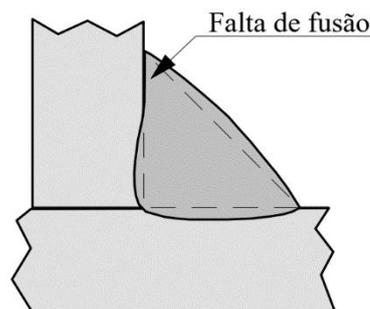
Trata-se dos vazios formados na região posterior da poça de fusão devido à evolução dos gases à medida que a solda se solidifica. Habitualmente possuem formato esférico e estão comumente associados à presença de hidrogênio. A porosidade está diretamente relacionada à presença de contaminantes na região da solda, como sujidades, umidade e oxidação no metal base e/ou no metal de adição (ALMEIDA, 2010; MODENESI, 2001).

No processo de soldagem GMAW a vazão determinada para o gás de proteção tem influência direta na formação de porosidade. À medida que a corrente aumenta a poça de fusão também aumenta, tornando-se necessário uma maior vazão de gás. Se a vazão do gás não acompanhar o aumento da poça de fusão, essa se torna insuficiente e pode acarretar o aparecimento de poros e a perda de elementos de liga. Entretanto, vazões acima do necessário também podem gerar irregularidades no cordão de solda produzido (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

### 3.3.2.2 Falta de Fusão

A falta de fusão em uma junta soldada está relacionada ao aquecimento inadequado do material a ser soldado, de modo que a união necessária entre passes adjacentes da solda ou entre o metal de base e o metal de adição não ocorreu adequadamente. Um exemplo pode ser observado na Figura 3.11 (MODENESI, 2001).

**Figura 3.11 Falta de fusão**



Fonte: MODENESI, 2001.

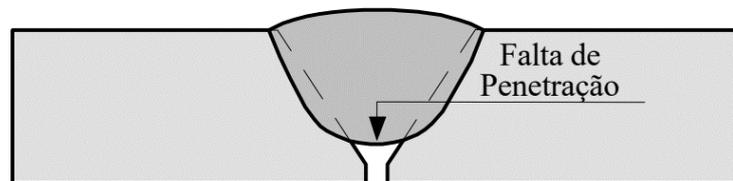
A situação está associada a uma manipulação inadequada do eletrodo ou do dimensionamento

incorreto do chanfro. A descontinuidade torna-se um grande concentrador de tensões, facilitando a nucleação de trincas e a redução da resistência mecânica (MODENESI, 2001).

### 3.3.2.3 Falta de Penetração

A falta de penetração, representada esquematicamente na Figura 3.12, está associada à insuficiência do preenchimento por metal fundido na região da raiz da junta soldada. Essa descontinuidade pode ser causada pela manipulação incorreta do eletrodo e por um projeto inadequado de junta ou de chanfro. A descontinuidade leva à redução da área útil soldada, agindo como um concentrador de tensões (MODENESI, 2001).

**Figura 3.12 Falta de penetração**



Fonte: MODENESI, 2001.

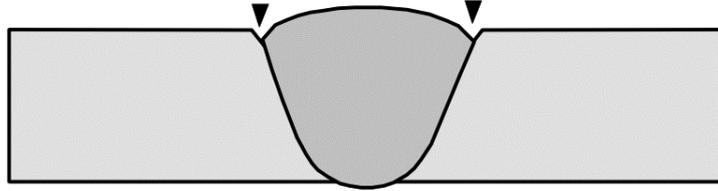
A quantidade de calor transmitida à peça está diretamente associada à velocidade de soldagem. Velocidades muito reduzidas podem aumentar o custo operacional e gerar problemas metalúrgicos pelo excesso de calor transmitido à peça, já velocidades excessivamente elevadas reduzem drasticamente o calor transmitido à peça, podendo ocasionar falta de penetração lateral, mordeduras e penetração insuficiente do cordão de solda (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

### 3.3.2.4 Mordedura

O termo mordedura descreve reentrâncias formadas pela ação da fonte de calor do arco elétrico que podem ser encontradas entre os passes de solda ou entre a solda e o metal base. Exemplificada na Figura 3.13, essa descontinuidade pode gerar regiões de inclusão de óxidos e vazios, além de formar uma área com elevada concentração de tensões, levando à, por exemplo, nucleação de trincas. Sua formação está associada à parâmetros incorretos na execução da operação de soldagem, como manipulação inadequada do eletrodo, comprimento excessivo do

arco e corrente elevada (MODENESI, 2001).

**Figura 3.14 Mordeduras**



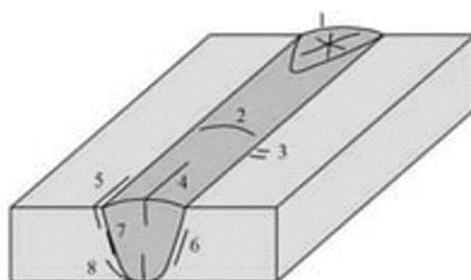
Fonte: MODENESI, 2001.

### 3.3.2.5 Trincas

São normalmente consideradas as discontinuidades mais graves em uma junta soldada, por apresentarem elevada capacidade de concentração de tensões, favorecendo a ocorrência de fraturas frágeis ao longo da peça. As trincas estão relacionadas à incapacidade de um material resistir às tensões de tração impostas a ele. No caso das juntas soldadas pelo método GMAW, a ausência de escória leva a uma maior velocidade de resfriamento, o que aumenta a probabilidade de trincas (MODENESI, 2001; WEINER, 2004; MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Vários mecanismos estão associados à formação de trincas, os principais são a fissuração na solidificação, ou fissuração a quente, associada à formação de películas de material líquido no interior da peça. A fissuração por hidrogênio, também denominada fissuração a frio, ocorre um tempo após o processo de soldagem e sua formação está associada à presença de hidrogênio, em uma microestrutura sensível, como a martensita. Diferentes fatores levam a formação de diferentes trincas, as mais comuns estão representadas na Figura 3.15 (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

**Figura 3.15 Trincas em junta soldada**



1. Trinca de Cratera
2. Trinca Transversal na ZF
3. Trinca Transversal na ZTA
4. Trinca Longitudinal
5. Trinca na Margem da Solda
6. Trinca Sob o Cordão
7. Trinca na Linha de Fusão
8. Trinca na Raiz da Solda

Fonte: Adaptado de MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009.

### **3.3.3 *Descontinuidades Decorrentes das Propriedades do Material***

As principais descontinuidades relacionadas às propriedades dos materiais estão relacionadas às suas características químicas e mecânicas. Variações em características importantes como resistência à tração, limite de escoamento, ductilidade, resistência ao impacto e dureza podem ser decorrentes do processo de soldagem. A principal propriedade química que deve ser controlada em uma peça soldada é a sua resistência à corrosão que pode diminuir após a realização da operação, levando a ocorrência de corrosão intergranular, corrosão sob tensão e corrosão preferencial na solda (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

## **3.4 Inspeção em Juntas Soldadas**

Diversos parâmetros devem ser avaliados durante a realização da inspeção em uma junta soldada. Deve-se avaliar o processo, os equipamentos, a especificação e qualificação tanto do procedimento quanto do soldador, e a metalurgia da soldagem. A realização de ensaios destrutivos e não destrutivos ao longo de todo o processo é imprescindível. Os ensaios não destrutivos são normalmente realizados nas inspeções durante e após o procedimento de soldagem (MODENESI, 2001).

### **3.4.1 *Ensaio Não Destrutivos***

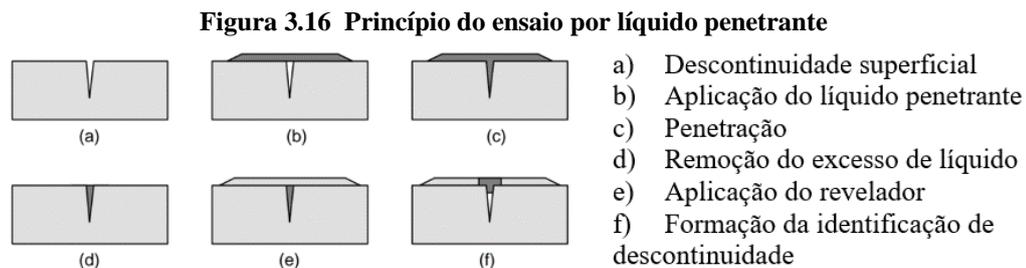
Trata-se de ensaios a serem realizados em peças com a intenção de validar suas características. Diferentemente dos ensaios destrutivos, esses não interferem no uso ou no processamento posterior da peça. Inúmeros métodos não destrutivos apresentam aplicações úteis na inspeção de juntas soldadas. Os resultados dos ensaios não destrutivos são, em sua maioria, indiretos, ou seja, devem ser relacionados às propriedades de interesse a fim de determinar as descontinuidades (MODENESI, 2001).

Ensaio visuais são a primeira etapa do procedimento de inspeção por END's em uma junta soldada, caso as especificações não sejam atendidas nessa etapa do procedimento, não se faz necessário a realização das demais técnicas. O ensaio avalia dimensões, forma, acabamento e a existência de trincas ou poros na superfície da peça, principalmente, na região da junta soldada (MODENESI, 2001).

### 3.4.1.1 Líquido Penetrante

O ensaio por líquidos penetrantes é essencialmente utilizado para verificação de descontinuidades abertas à superfície, como trincas, poros e dobras. A técnica depende diretamente da rugosidade e da limpeza da superfície a ser analisada, no caso de superfícies rugosas ou sujas os resultados não se mostram eficazes (MODENESI, 2001).

Para que os resultados da técnica sejam satisfatórios a peça deve ser corretamente limpa antes do início do ensaio. Após o procedimento de limpeza o líquido penetrante, que pode ser vermelho ou fluorescente, deve ser aplicado formando um filme sobre a superfície, sua aplicação pode ser feita de diversas maneiras, dentre elas spray, aplicação por pincel ou imersão. Em sequência deve-se aguardar o tempo de penetração conforme indica a norma utilizada. Em seguida o líquido deve ser removido da superfície com água em pressão controlada, para que não afete os resultados do ensaio. Com a superfície da peça limpa e seca aplica-se o revelador, que tem como função absorver o líquido que ficou alojado nas descontinuidades de modo a observar a presença, a extensão e a profundidade dessa, o passo a passo do ensaio por líquido penetrante é detalhado na Figura 3.16 (ANDREUCCI, 2018).



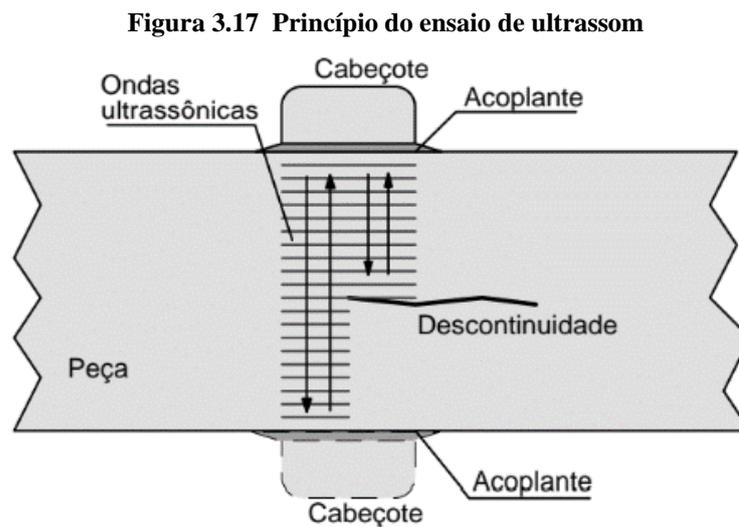
Fonte: Adaptado de MODENESI, 2001

Suas principais limitações são a necessidade de as descontinuidades serem abertas à superfície para que seja possível identificá-las, e as restrições relacionadas ao acabamento da superfície, além da toxicidade dos líquidos utilizados. Como vantagem, esse método de ensaio permite a identificação de descontinuidades de qualquer dimensão, formato ou direção, quando abertas à superfície, e a sua realização em qualquer ambiente ou posicionamento, desde que a peça seja susceptível à limpeza (ANDREUCCI, 2018).

A aplicação do método em juntas soldadas permite a identificação de trincas de topo, além de porosidade e mordeduras.

### 3.4.1.2 Ultrassom

O ensaio por ultrassom consiste na aplicação de um feixe de ultrassom no material, o tempo que o feixe emitido demora para retornar ao emissor demonstra a distância da descontinuidade em relação a superfície. Já as variações desse tempo, aumentando ou diminuindo, ao longo do deslocamento lateral do transdutor é capaz de mostrar a dimensão e o posicionamento da descontinuidade na peça inspecionada. A Figura 3.17 demonstra de maneira resumida o funcionamento do aparelho (MODENESI, 2001).



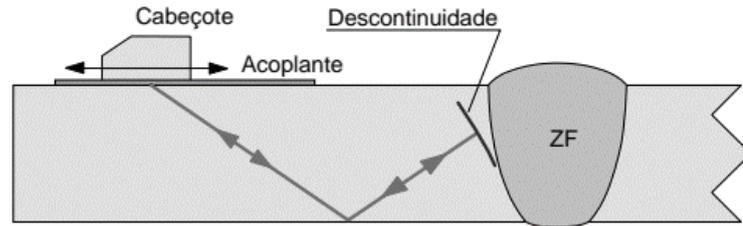
Fonte: MODENESI, 2001.

O ultrassom gerado por um cabeçote de material piezoelétrico é direcionado à peça e a técnica de “pulso-eco” é aplicada, o seu funcionamento se assemelha ao de um radar, ou seja, uma certa quantidade de ondas mecânicas é emitida de maneira periódica em direção a peça em análise e o mesmo cabeçote que as emite funciona como receptor das ondas que foram refletidas pelas interfaces e/ou descontinuidades presentes na peça (MODENESI, 2001).

No caso da aplicação da técnica em juntas soldadas, o reforço superficial da solda dificulta o acoplamento de cabeçotes retos, fazendo com que seja necessário o uso de cabeçotes em que a onda é emitida de maneira angular em relação à peça, como apresentado na Figura 3.18, ou que a região do reforço superficial do cordão de solda seja planificada, por uma fresadora, por exemplo, dessa forma, as ondas podem ser emitidas de perpendicular à peça, simplificando o processo. A aplicação do ensaio em peças soldadas permite a identificação de todos os tipos de descontinuidades, mesmo as mais internas, tornando assim a inspeção mais eficiente e rápida

(MODENESI, 2001).

**Figura 3.18** Ensaio de ultrassom em juntas soldadas com transdutor angular



Fonte: MODENESI, 2001.

O método de ensaio por ultrassom tem como principal vantagem a detecção de descontinuidades pequenas e internas, principalmente trincas. Outra vantagem é que o ensaio não apresenta nenhum risco a saúde, não sendo necessário nenhum plano especial de segurança para sua utilização. Entretanto, a técnica requer elevado conhecimento e experiência do executor além de não apresentar resultados satisfatórios em peças de espessura reduzida (ANDREUCCI, 2018).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na preparação e confecção das amostras são descritos a seguir.

- Barras chatas de aço AISI 1020 de 19 mm por 80 mm por 600 mm, a Tabela 4.1 apresenta a composição do aço AISI 1020 de acordo com a NBR NM 87:2000.

**Tabela 4.1 Composição aço AISI 1020**

	AISI 1020
% Carbono	0,18 – 0,23
% Manganês	0,3 – 0,6
% Fósforo	0,04
% Enxofre	0,05

Fonte: NBR NM 87:2000.

O fluxograma apresentado na Figura 4.1 detalha a metodologia de pesquisa utilizada.

**Figura 4.1 Fluxograma da metodologia**



Fonte: Autora, 2024.

#### 4.1.1 Confeção e preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir do corte de duas barras de aço AISI 1020, utilizando uma Serra Fita Horizontal Franho FM-1600, apresentada na Figura 4.2. Foram obtidas as dimensões finais de 19 mm x 46 mm x 83 mm.

**Figura 4.2 Serra Fita Horizontal FM-1600**

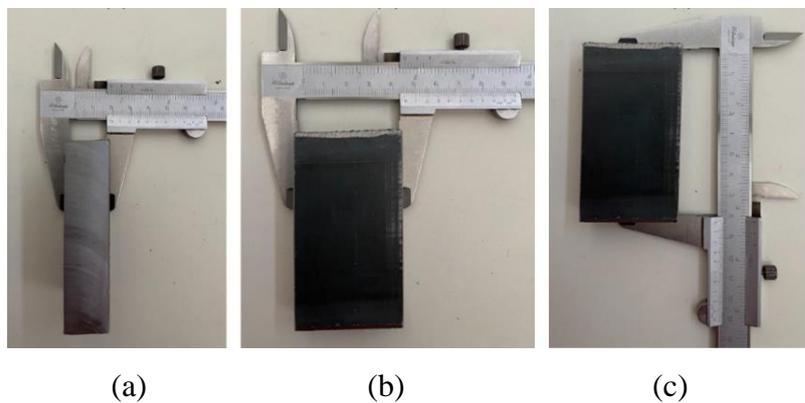


Fonte: Autora, 2024.

As rebarbas dos corpos de prova foram removidas com um esmeril antes da confecção dos chanfros e as medidas foram aferidas com um paquímetro analógico, conforme Figura 4.3.

**Figura 4.3 Medição dos corpos de prova**

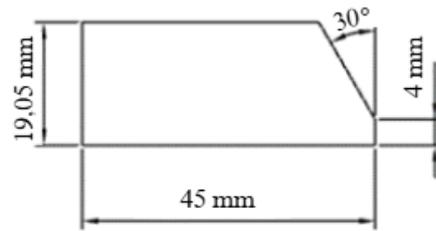
**(a) 19 mm (b) 45,20 mm (c) 81,38 mm**



Fonte: Autora, 2024.

Os chanfros foram confeccionados conforme desenho técnico apresentado na Figura 4.4, utilizando a Fresadora Universal Clever FH-4, mostrada na Figura 4.5.

**Figura 4.4** Desenho técnico dos corpos de prova fresados



Fonte: Autora, 2024.

**Figura 4.5** Fresadora Universal Clever FH-4



Fonte: Autora, 2024.

Inicialmente foi realizado o faceamento das laterais e, na sequência, uma fresa de topo de aço rápido de 20 mm foi acoplada à fresadora para a realização dos cortes dos ângulos de bisel conforme Figura 4.6, todos os cortes foram realizados com fluido de corte. Foram confeccionados dois corpos de prova com 4 mm de nariz e 30° de ângulo de bisel.

**Figura 4.6** Corte dos ângulos de bisel



Fonte: Autora, 2024.

#### 4.1.2 Operação de soldagem e obtenção de dados

A primeira operação a ser realizada foi o ponteamo manual, pelo processo GMAW dos corpos de prova. A operação teve a intenção de fixar os componentes para posterior soldagem. Os corpos de prova foram posicionados sobre uma superfície plana, a uma distância de 2 mm, padronizada com o auxílio de um arame de 2 mm de diâmetro entre as peças.

O equipamento *Power Wave*® S350, equipado com o alimentador de fios LF-45, ambos da Lincoln Electric, Figura 4.7, foi utilizado nas operações de soldagem realizadas. A indutância foi configurada com o valor de  $-5$  e a velocidade de alimentação (VA) variou ao longo dos experimentos. A máquina de soldagem foi conectada a um computador para que fosse realizada a aquisição, em tempo real, dos parâmetros da soldagem a uma taxa de 1200 dados por segundo, pelo software *Power Wave Manager*®.

**Figura 4.7** Máquina de solda - *Power Wave*® S350



Fonte: Autora, 2024.

Um mecanismo de deslocamento, da marca S.A White Martins, também conhecido como tartilope, foi usado para realização da soldagem mecanizada conforme apresentado na Figura 4.8, sua utilização visou garantir a uniformidade do processo. O tartilope conta com um braço acoplador, no qual foi colocado a tocha de soldagem, tornando possível manter a velocidade de deslocamento da tocha (VD) e a distância entre a tocha e o corpo de prova padronizadas.

**Figura 4.8 Sistema mecanizado do processo GMAW**



Fonte: Autora, 2024.

A tocha foi posicionada de maneira perpendicular e centralizada em relação ao corpo de prova, a uma distância de 20 mm da base da solda. Após a montagem, utilizando o gás de proteção com 20% de dióxido de carbono e 80% de argônio e o arame tubular Kestra ER 70S -2, com diâmetro de 1,2 mm, foi realizado o passe de raiz em cada corpo de prova. Os parâmetros utilizados em cada teste estão relacionados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 Parâmetros de teste**

	01	02
Ângulo (°)	30	30
Nariz (mm)	4	4
VA (in/min)	151,18	137,5
VD (cm/min)	-	19,10

Fonte: Autora, 2024.

Os chanfros foram preenchidos por uma sequência de cordões de solda, sendo o do corpo de prova 01 (um) preenchido por passes manuais, de maneira pouco cuidadosa, a fim de gerar descontinuidades, e o do corpo de prova 02 (dois) preenchido de maneira mecanizada, com o auxílio do tartflope, visando a minimização das descontinuidades.

A fim de manter a padronização dos corpos de prova, todas as soldas foram feitas utilizando os mesmos parâmetros, para que, dessa forma, haja o mesmo tipo de transferência metálica e a mesma quantidade de energia seja fornecida a ambos.

### **4.1.3 Preparação dos corpos de prova para realização dos ensaios**

Com os chanfros já preenchidos os corpos de prova foram preparados a fim de obter um melhor resultado na identificação de descontinuidades. Primeiramente os corpos de prova tiveram 20 mm das extremidades cortadas com uma Serra Fita Horizontal Franho FM-1600 para remover a sessão inicial e final, momentos nos quais o arco elétrico é aberto e extinto, essas extremidades podem ter características diferentes da maior parte do cordão de solda.

Na sequência as faces laterais do corpo de prova foram fresadas, com a Fresadora Universal Clever FH-4 a fim de melhorar o acabamento do corte, e facilitar o procedimento a ser realizado para análise metalográfica da região. O topo do corpo de prova também foi fresado na região em que se encontrava o cordão de solda para que fosse possível realizar o ensaio de ultrassom com um transdutor reto.

### **4.1.4 Análise Metalográfica - Macrografia**

A análise metalográfica foi realizada nos corpos de prova já processados a fim de melhorar a visualização dos defeitos superficiais das peças. Em sequência, as peças 01 e 02 passaram pelo processo de lixamento. O processo é ilustrado pela Figura 4.9.

**Figura 4.9 Lixamento das peças em lixa #600**



Fonte: Autora, 2024.

Após alcançarem acabamento superficial satisfatório as peças foram lavadas, com água e álcool 70%, e secas, com jato de ar paralelo à superfície a fim de evitar manchas decorrentes da secagem. Limpas e secas as peças foram levadas à capela para o ataque com nital, ácido nítrico em solução de álcool etílico, na proporção de 5%, o procedimento é ilustrado na Figura 4.10.

As peças foram, novamente, lavadas com água, detergente e álcool 70%, e secas. Na sequência foram registradas foto macrografias das peças para registro e análise.

**Figura 4.10 Procedimento de ataque ácido com nital 5%**



Fonte: Autora, 2024.

#### **4.1.5 Ensaio de Ultrassom**

O ensaio de ultrassom foi realizado nos corpos de prova a fim de identificar e localizar descontinuidades internas e seguiu as seguintes etapas:

- O ultrassom SONATEST POWERSCAN 450 foi calibrado de acordo com as especificações do manual;
- O acoplante foi colocado sobre a face superior das peças;
- Com um transdutor reto, o ensaio foi realizado na região previamente fresada da peça, conforme ilustrado na Figura 4.11;

**Figura 4.11 Transdutor reto sendo utilizado para realização de ensaio de ultrassom**



Fonte: Autora, 2024.

As informações da tela do ultrassom, ilustrada na Figura 4.12, foram registradas continuamente para que os resultados fossem analisados e as descontinuidades fossem localizadas;

**Figura 4.12 Tela do equipamento de ultrassom**



Fonte: Autora, 2024.

O medidor de espessura SONATEST BETAGAGE foi utilizado ao final do teste de ultrassom para confirmar em duplicata os valores referentes à profundidade dos defeitos. A Figura 4.13 apresenta o medidor de espessura utilizado.

**Figura 4.13 Medidor de espessura SONATEST BETAGAGE**



Fonte: Autora, 2024.

#### ***4.1.6 Ensaio de Líquido Penetrante***

O ensaio de líquido penetrante foi utilizado para que as descontinuidades superficiais do corpo de prova fossem identificadas, mensuradas e analisadas. O ensaio se seguiu pelas seguintes

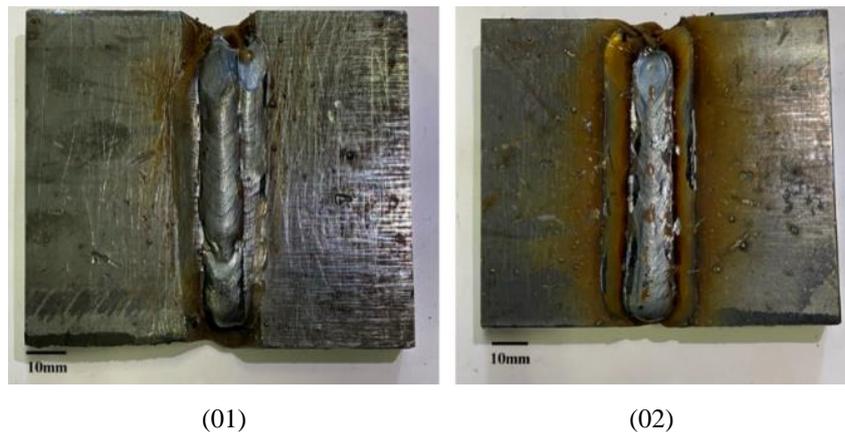
etapas:

- As peças passaram pelo processo de lavagem e secagem para que fosse retirado qualquer resquício do acoplante usado no ensaio anterior;
- O líquido penetrante Metal Chek VP30 foi aplicado em toda a superfície da peça e aguardou-se o tempo de penetração de 15 minutos conforme indicado pelo fornecedor;
- O líquido penetrante foi removido com água a baixa pressão e o corpo de prova foi cuidadosamente seco;
- Uma fina camada do revelador não aquoso Magnaflux® SKD-S2 foi aplicada sobre o corpo de prova.
- Após aguardar 15 minutos, conforme instruções do fabricante, foram registradas as imagens do ensaio com a intenção de registrar e classificar as descontinuidades.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A realização dos ensaios permitiu avaliar, visualmente as diferenças entre o corpo de prova soldado manualmente, 01, e o soldado de maneira mecanizada, 02. A Figura 5.1 apresenta os corpos de prova 01 e 02, respectivamente. Enquanto o corpo de prova 01, que teve seu chanfro preenchido manualmente, apresenta um cordão de solda irregular, o corpo de prova 02, no qual o chanfro foi preenchido de maneira mecanizada, o cordão de prova apresenta uma maior uniformidade.

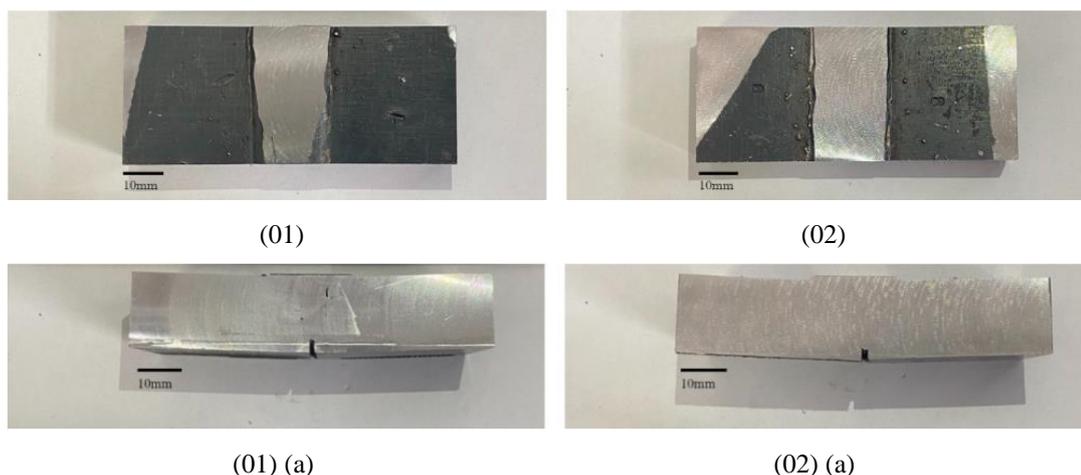
**Figura 5.1** Corpos de prova 01 e 02 com os chanfros preenchidos



Fonte: Autora, 2024.

Após o processamento dos corpos de prova, as diferenças visuais entre eles foram minimizadas, mas ainda podiam ser observadas. Conforme apresentado na Figura 5.2.

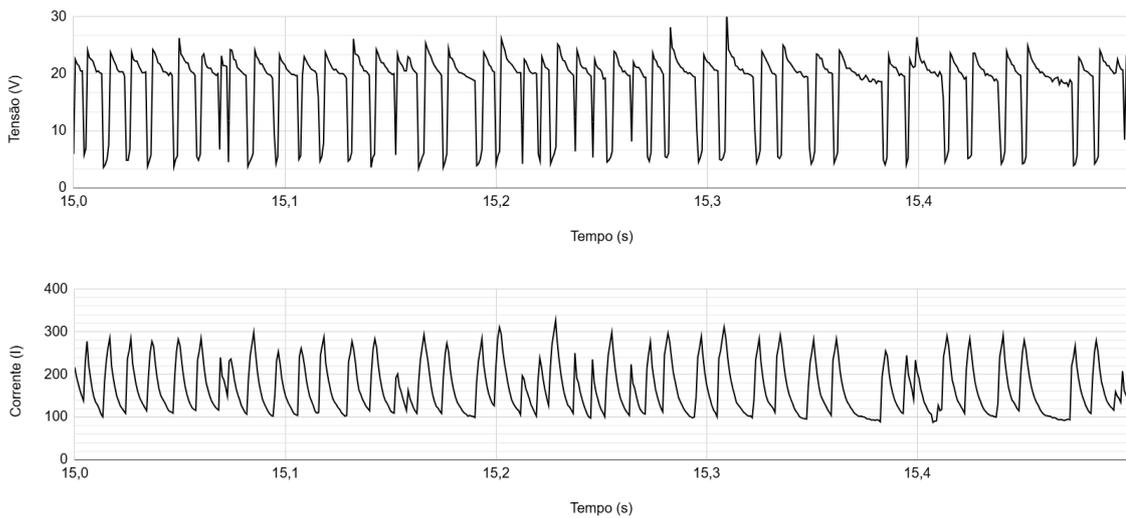
**Figura 5.2** Topo, faces (a) e (b) dos de prova 01 e 02 após fresamento



Fonte: Autora, 2024.

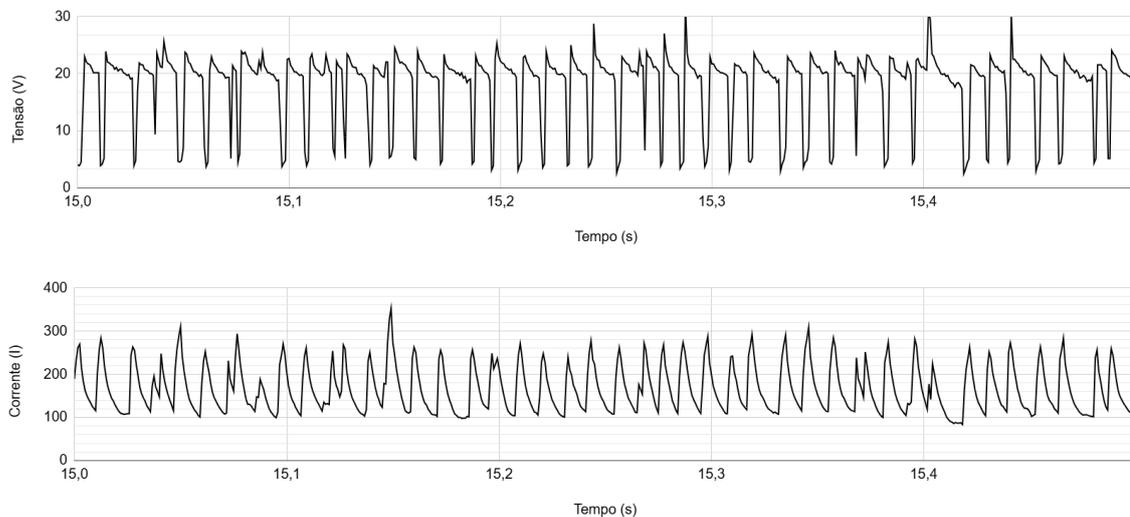
Os corpos de prova foram soldados com os mesmos parâmetros e tiveram o método de transferência metálica cuidadosamente monitorado para que não houvesse variações. Os oscilogramas de corrente (I) e tensão (V) foram registrados em ambos os processos, e são apresentados na Figura 5.3, para o corpo de prova 01 e na Figura 5.4 para o corpo de prova 02, a fim de demonstrar que as transferências metálicas ocorreram por curto-circuito em ambos os testes.

**Figura 5.3 Oscilogramas de tensão (V) e corrente (I) do corpo de prova 01**



Fonte: Autora, 2024.

**Figura 5.4 Oscilogramas de tensão (V) e corrente (I) do corpo de prova 02**



Fonte: Autora, 2024.

## 5.1 Corpo de prova 01

O corpo de prova 01 foi soldado manualmente, a tocha foi aproximada e afastada do corpo de prova e a velocidade de descolamento da tocha também foi alterada para que fossem produzidos diferentes tipos de descontinuidades entre os cordões de solda.

### 5.1.1 Foto macrografia

Na foto macrografia realizada no corpo de prova 01, face (b), apresentada na Figura 5.5, é possível observar descontinuidades como falta de penetração lateral e vazios, decorrentes das alterações de parâmetros ao longo do processo de deposição do metal de adição. O afastamento da tocha e consequente redução do gás de proteção na poça de fusão é uma provável razão para a formação de vazios. Já a falta de penetração lateral se dá pela redução do calor fornecido por efeito joule, sendo outra consequência do afastamento da tocha.

Figura 5.5 Foto macrografia do corpo de prova 07, face (b)



Fonte: Autora, 2024.

### 5.1.2 Ultrassom e medição de espessura

O aparelho de ultrassom apresenta picos em seu gráfico quando uma onda emitida pelo transdutor encontra uma interferência, sendo a interface da peça com o ar ou a interface entre o material da peça e uma descontinuidade.

No ensaio de ultrassom realizado no corpo de prova 01, foram detectados, em sua maioria, pulsos de aproximadamente 20 mm, que correspondem à base do corpo de prova. Entretanto, também foram captados pulsos de aproximadamente 11 mm, dessa forma, pode-se considerar que esse corpo de prova apresenta uma descontinuidade a aproximadamente 11 mm de profundidade em relação ao topo da peça, ambas as situações foram exemplificadas na Figura

5.6.

**Figura 5.6** Aparelho de ultrassom com e sem a identificação de descontinuidade

Fonte: Autora, 2024.

A fim de confirmar, em duplicata, as informações obtidas pelo ultrassom, foi utilizado um medidor de espessura. Esse equipamento não é indicado para a identificação de descontinuidades por não permitir avaliar suas dimensões, entretanto é capaz de localizar sua profundidade na peça. A Figura 5.7 apresenta o aparelho identificando a medida de 20,25 mm que corresponde a espessura total da peça e uma espessura de 10,33 mm que pode ser associada à descontinuidade, encontrada a aproximadamente 11 mm de profundidade pelo ultrassom, confirmando assim sua presença. A aproximação dos resultados obtidos a partir do medidor de espessura e do ultrassom mostra que aparelho de medição de espessura, que é um equipamento de menor custo e de fácil utilização, pode ser uma alternativa ao método de ultrassom para a constatação inicial da presença de descontinuidades internas em uma peça soldada.

**Figura 5.7** Medidor de espessura identificando a profundidade referente à base da peça

Fonte: Autora, 2024.

### 5.1.3 Líquido Penetrante

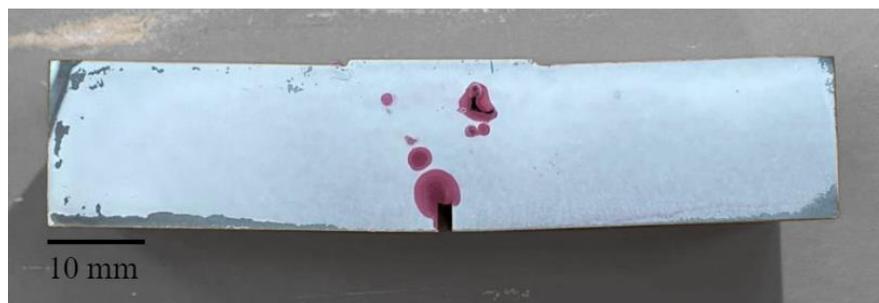
O líquido penetrante foi aplicado tanto no topo da peça, que estava previamente fresada, quanto na face (a), a mesma em que foi registrada a foto macrografia. No corpo de prova 01, como mostrado na Figura 5.8 havia uma trinca no topo, identificada visualmente e pelo ensaio de líquido penetrante. Já na face (a) do corpo de prova, na Figura 5.9 o líquido penetrante evidenciou as descontinuidades previamente observadas na foto macrografia.

**Figura 5.8** Ensaio de líquido penetrante realizado no topo do corpo de prova 01



Fonte: Autora, 2024.

**Figura 5.9** Ensaio de líquido penetrante realizado na face (a) do corpo de prova 01



Fonte: Autora, 2024.

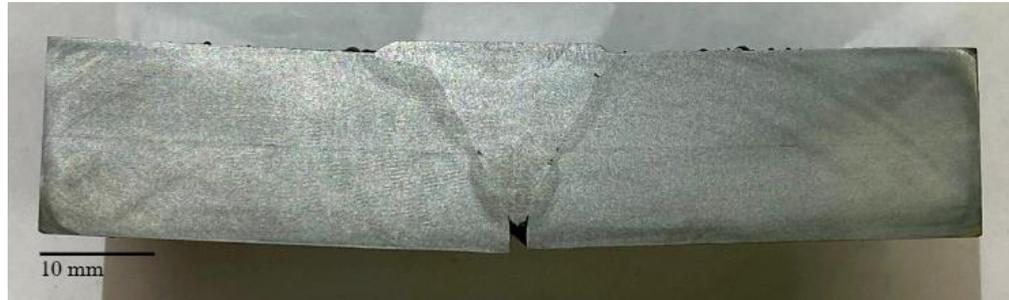
## **5.2** Corpo de prova 02

O corpo de prova 02 foi soldado mecanicamente. O uso do tartilope permitiu que a tocha fosse mantida a uma distância padrão do corpo de prova e se descolasse em velocidade controlada, minimizando assim as descontinuidades da junta soldada.

### **5.2.1** Foto macrografia

Na foto macrografia realizada no corpo de prova 08, face (a), apresentada na Figura 5.10, foi observada uma quantidade reduzida de descontinuidades quando comparada ao corpo de prova

01.

**Figura 5.10 Foto macrografia do corpo de prova 02, face (a)**

Fonte: Autora, 2024.

### 5.2.2 Ultrassom e medição de espessura

No ensaio de ultrassom realizado no corpo de prova 02, foram detectados, em sua maioria, pulsos de aproximadamente 20 mm, que correspondem à base do corpo de prova. A medição de espessura também foi realizada no corpo de prova 02 a fim de confirmar, em duplicata a ausência de descontinuidades. O medidor de espessura identificou a medida de aproximadamente 19,74 mm que corresponde a espessura total da peça, confirmando os dados obtidos pelo ultrassom. A Figura 5.11 apresenta o resultado de ambos os testes. As descontinuidades identificadas na foto macrografia do corpo de prova 02 foram diminutas e a realização do ensaio de ultrassom e de espessura reforçaram a ausência de descontinuidades de grandes dimensões na amostra.

**Figura 5.13 Aparelho de ultrassom e de medição de espessura sem que nenhuma descontinuidade fosse identificada**

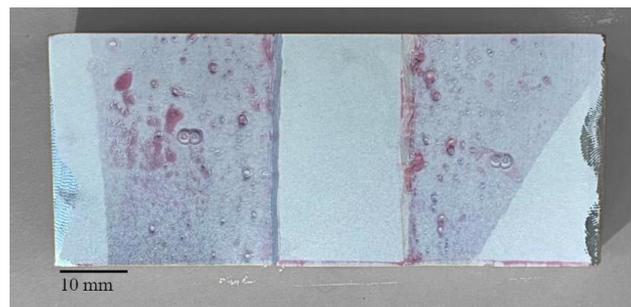


Fonte: Autora, 2024.

### 5.2.3 Líquido penetrante

O líquido penetrante foi aplicado tanto no topo quanto na face (a) do corpo de prova 02, a mesma em que foi registrada a foto macrografia. No referido corpo de prova, não haviam sido identificadas descontinuidades significativas visualmente. A Figura 5.14, que apresenta o topo do corpo de prova após a realização do ensaio de líquido penetrante e reitera a ausência de descontinuidades nessa região.

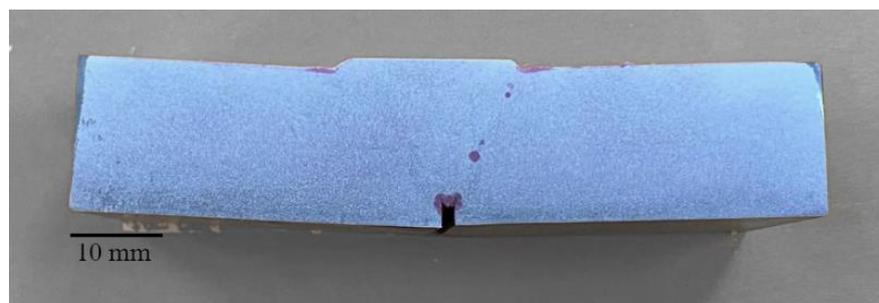
**Figura 5.14** Ensaio de líquido penetrante realizado no topo do corpo de prova 02



Fonte: Autora, 2024.

Entretanto, na face (a) do material, a presença de descontinuidades, na lateral dos cordões de solda, pode ser considerada decorrente da falta de fusão lateral, conforme Figura 5.15, mostrando que, mesmo em um processo mecanizado a ausência de descontinuidades não é algo simples de ser alcançado. Apesar da presença de descontinuidades no corpo de prova 02, essas foram diminutas quando comparadas às do corpo de prova 01.

**Figura 5.15** Ensaio de líquido penetrante realizado no topo do corpo de prova 02



Fonte: Autora, 2024.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal caracterizar e inspecionar cordões de solda produzidos pelo processo GMAW mecanizado em corpos de prova de aço AISI 1020 com chanfros em “V”. Foram avaliados o tipo de transferência metálica predominante no processo de soldagem utilizado, foram realizadas a análise visual e macrográfica dos corpos de prova, e foram aplicados os ensaios não destrutivos de líquido penetrante e ultrassom.

A confecção de corpos de prova com chanfros em “V”, a partir da fresagem, permitiu um controle dimensional preciso, facilitando o processo de soldagem mecanizada, que, por sua vez, mostrou-se eficiente, sem que fossem observadas descontinuidades significativas nos cordões depositados.

A utilização do sistema de aquisição de dados, Power Wave® S350 e a confecção dos oscilogramas de tensão e corrente do processo confirmaram que a soldagem foi realizada com transferência metálica por curto-circuito.

Já as macrografias obtidas após a soldagem evidenciaram a presença ou ausência de descontinuidades, como trincas, poros e falta de fusão lateral, o ensaio de líquido penetrante identificou descontinuidades superficiais em um dos corpos de prova, enquanto o ensaio de ultrassom detectou descontinuidades internas.

Através deste estudo, foi possível explorar diferentes processos de fabricação, como usinagem e soldagem, além de técnicas de inspeção destrutivas e não destrutivas. A aplicação dessas técnicas permitiu não apenas identificar suas vantagens e limitações, mas também aplicar conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso.

## REFERÊNCIAS

- CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p., il. ISBN 978-85-216-1595-8.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação**. Editora Mc Graw-Hill, 2ed., v.II, São Paulo, 1986.
- MARQUES, P.V; MODENESI, P.J; BRACARENSE, A.Q. 2009 **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Editora UFMG, 2009.
- WAINER, E; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo, SP. Editora Edgard Blücher LTDA. 2004.
- MODENESI, P.J. **Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas**. Belo Horizonte, MG. 2001.
- MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D.B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte, MG. 2012.
- ALMEIDA, R.S. **Defeitos em solda detectável através da inspeção visual**. Orientador: Prof. M. Sc. Ronaldo Luis Angulski. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário Luterando de Manaus, Manaus, AM, 2010.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**, ABENDI/SP. São Paulo, SP. 2018.
- ANDREUCCI, R. **Líquidos penetrantes**. ABENDI/SP. São Paulo, SP. 2018.
- KRISHNAN, T.M; BALAMURUGAN, C; DINAHARAN, I; PALANIVEL, R. **MIAB welding of alloy steel tubes in pressure parts: metallurgical characterization and nondestructive testing**. Journal of Manufacturing Processes, [s. l.], 9 Nov. 2011.
- DEEPAK, J.R; RAJA V.K. Bupesh; SRIKANTH, D; SURENDRAN, H; NIKOLAS, M.M. **Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: a review and experimental study**. Materials Today: Proceedings, [s. l.], 8 jan. 2021.
- BRUNO, D.P. **Inspeção de juntas soldadas**. 2020. Dissertação de Mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Pt, 2020.
- STOCCO, D. **Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.
- KERAN, Z; MIHALJEVIC, M. NOVAK, A.H; RUNJE, B. **Nondestructive testing of forge welding joint Errors**. Annals of DAAAM for & proceedings of the International DAAAM Symposium, 1 Jan. 2018.
- THE AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.5. Specification for low-alloy steel electrodes for shielded Metal Arc Welding**. AWS, 2014.
- THE AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.1/A5.1M. Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding**. AWS, 2012.
- THE AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook – Welding Processes**. Volume 2, 8ª edição, AWS, Miami, 1991, 955 p.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. 1 ed. 1996.
- FELIZARDO, I. Apostila – **Tecnologia da soldagem**, CEFET/MG. Belo Horizonte, MG. 2016.
- THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **Procedure handbook of arc welding Design and Practice**. [s.l: s.n.]. 1940