

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

**GUSTAVO SCHERNER PROVIN**

**INFLUÊNCIA DO MODO DE TRANSFERÊNCIA CONTROLADA NA  
PENETRAÇÃO E VELOCIDADE DE SOLDAGEM APLICADOS EM AÇOS DE  
ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA**

**CAXIAS DO SUL  
2022**

**GUSTAVO SCHERNER PROVIN**

**INFLUÊNCIA DO MODO DE TRANSFERÊNCIA CONTROLADA NA  
PENETRAÇÃO E VELOCIDADE DE SOLDAGEM APLICADOS EM AÇOS DE  
ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de fabricação.

Professor Orientador:  
Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

**CAXIAS DO SUL  
2022**

**GUSTAVO SCHERNER PROVIN**

**INFLUÊNCIA DO MODO DE TRANSFERÊNCIA CONTROLADA NA  
PENETRAÇÃO E VELOCIDADE DE SOLDAGEM NA APLICAÇÃO EM AÇOS DE  
ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de fabricação.

**Aprovado em:** \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

**Banca Examinadora:**

---

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

---

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Eng. Alexandre Viecelli  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## RESUMO

O exposto trabalho teve por finalidade comparar dois processos de soldagem GMAW com transferência controlada, o curto-circuito controlado pela corrente pulsada HD-Pulse e o curto-circuito controlado S-AWP, avaliando as características produtivas e metalúrgicas dos cordões produzidos. A modernização dos processos e modos de transferência de soldagem GMAW têm sido cada vez mais exploradas, devido às crescentes demandas produtivas e às exigências metalúrgicas e mecânicas provenientes dos desenvolvimentos de novos materiais. Ademais, o estudo dos modos de transferência é fundamental para qualificar as características do processo, como estabilidade de arco, incidência de respingos, aspectos geométricos do cordão de solda e a eficácia de fusão do metal base. Para esse fim, foi aplicado os processos citados em dois aços alta resistência e baixa liga (ARBL), em duas variações de espessura. Para todas as condições, se assumiu a posição horizontal, com mistura gasosa de 82% de Argônio e 18% de Dióxido de Carbono, arame sólido com 1,2 mm de diâmetro e ângulos de tocha idênticos. As técnicas foram avaliadas por meio das medições de energia de soldagem, taxa de deposição, rendimento metálico, macrografia, perfil de dureza além da coleta da curva elétrica na saída da fonte de solda. Também foram realizadas correlações entre taxa de deposição e velocidade de alimentação de arame e da energia de soldagem com a dureza média na ZTA. Os resultados revelaram que o curto-circuito controlado possui menor energia de soldagem para realizar o mesmo tamanho de perna de solda, entretanto, teve rendimento metálico e taxa de deposição inferior em relação a curva pulsada. Notou-se também, que para a mesma corrente média, em ambos os processos, a taxa de alimentação de arame foi diferente, indicando que cada curva sinérgica têm as suas características, além de reforçar os resultados de taxa de deposição. Devido ao aporte de energia inferior do curto-circuito, o processo se mostrou em vantagem na maioria das análises de dureza da ZTA, apresentando valores inferiores, ainda assim, as variações de energia entre os processos não tiveram impacto significativo quando analisados com a média das durezas na zona afetada termicamente. As macrografias mostraram que ambos os processos atingiram penetrações aceitáveis. O HD-Pulse foi mais eficiente ao ter fusão mais profunda na raiz da junta e apresentando concavidade menor do filete de solda, mesmo com velocidades de soldagem 23% superiores. A relevância deste estudo resultou no auxílio da tomada de decisão referente a escolha do modo de transferência controlado que melhor assemelha produtividade e algumas características de engenharia já citadas.

**Palavras-chave:** GMAW; Duplo Pulsado; Curto-Circuito Controlado; ARBL; Produtividade.

## ABSTRACT

The purpose of this work was to compare two GMAW welding processes with controlled transfer, controlled short-circuit by pulsed current HD-Pulse and the controlled short-circuit S-AWP, evaluating the productive and metallurgical characteristics of the beads produced. The modernization of GMAW welding modes transfer processes has been increasingly explored, due to the growing production demands and the metallurgical and mechanical requirements arising from the development of new materials. Furthermore, the study of transfer modes is essential to qualify the characteristics of the process, such as arc stability, incidence of spatter, geometric aspects of the weld bead, and the melting efficiency of the base metal. For this purpose, the processes were applied to two high-strength and low-alloy steels (HSLA), in two thickness variations. For all conditions, the horizontal position was assumed with a gas mixture of 82% Argon and 18% Carbon Dioxide, solid wire 1.2 mm in diameter and identical torch angles. The techniques were evaluated through measurements of welding energy (heat input), deposition rate, metallic yield, macrography, hardness profile, in addition to collecting the electrical curve at the output of the power source. Correlations were also made between deposition rate and wire feed speed and welding energy with the average hardness in the HAZ. The results revealed that the controlled short circuit has lower welding energy to perform the same size of weld, however, it had a lower metallic yield and deposition rate compared to the pulse curve. It was also noted that for the same average current, in both processes, the wire feed rate was different, indicating that each synergistic curve has its own characteristics, in addition to reinforcing the deposition rate results. Due to the lower energy input of the short circuit, the process proved to be an advantage in most of the HAZ hardness analyses, presenting lower values, even so, the energy variations between the processes had no significant impact when analyzed with the average of the hardness in the heat-affected zone. Macrographs showed that both processes reached acceptable penetrations. The HD-Pulse was more efficient by having deeper fusion at the joint root and presenting a smaller weld fillet concavity, even at 23% higher welding speeds. The relevance of this study resulted in the aid of decision making regarding the choice of the controlled transfer mode that best resembles productivity and some engineering characteristics already mentioned.

**Keywords:** GMAW; Double-pulsed; Short Circuit Controlled; HSLA; Productivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do processo de soldagem GMAW .....	15
Figura 2 - Aspecto do cordão de solda em função do tipo de gás .....	16
Figura 3 - Diferença entre os modos de transferência naturais .....	17
Figura 4 - Ilustração e gráfico de corrente e tensão no processo por curto-circuito.....	18
Figura 5 - Ilustração e gráfico de corrente e tensão no processo globular .....	19
Figura 6 - Ilustração e gráfico de corrente e tensão no processo spray .....	19
Figura 7 - Esquemática do processo pulsado .....	21
Figura 8 - Representação da transferência duplo pulso .....	22
Figura 9 - Ciclo de trabalho do S-AWP .....	23
Figura 10 - Gráfico de corrente e tensão do processo S-AWP .....	23
Figura 11 - Gráfico de corrente e ciclo de trabalho do HD-Pulse .....	24
Figura 12 - Ilustração da curva pulsada.....	27
Figura 13 - Taxas de deposição comuns de alguns processos de solda.....	28
Figura 14 - Taxa de deposição em função da corrente para diferentes diâmetros de arame ....	29
Figura 15 - Desenho esquemático da seção transversal de uma solda .....	30
Figura 16 - Fluxograma das atividades realizadas .....	34
Figura 17 - Projeto dos corpos de prova.....	36
Figura 18 - Braço robótico, controlador e fonte de solda Panasonic.....	37
Figura 19 - Explicação do processo <i>weaving</i> na soldagem .....	38
Figura 20 - Exemplo amostra atacada por nital 5%.....	41
Figura 21 - Esquemática das cotas para medição da geometria da solda .....	42
Figura 22 - Sentido de deslocamento e medições do ensaio de dureza.....	43
Figura 23 - Resultados da soldagem.....	45
Figura 24 - Gráfico modo de transferência x energia de soldagem.....	46
Figura 25 - Gráfico corrente e tensão do processo S-AWP.....	47
Figura 26 - Gráfico corrente e tensão do processo HD-Pulse .....	47
Figura 27 - Gráfico modo de transferência x taxa de deposição .....	49
Figura 28 - Gráfico taxa de deposição x velocidade de alimentação de arame.....	49
Figura 29 - Gráfico modo de transferência x rendimento metálico.....	50
Figura 30 - Perfil de dureza A572 – 1/4” .....	51
Figura 31 - Perfil de dureza A572 – 3/8” .....	51
Figura 32 - Perfil de dureza USI LN 700 – 1/4” .....	52

Figura 33 - Perfil de dureza USI LN 700 – 3/8” .....	52
Figura 34 - Gráfico energia de soldagem x média de dureza na ZTA.....	53
Figura 35 - Resultados da macrografia.....	54
Figura 36 - Gráfico modo de transferência x garganta efetiva.....	55
Figura 37 - Gráfico modo de transferência x concavidade.....	55
Figura 38 - Gráfico velocidade de soldagem x garganta efetiva .....	56

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Rendimentos térmicos típicos dos processos de soldagem .....	27
Tabela 2 - Intervalos de elementos químicos em aços ARBL.....	32
Tabela 3 - Composição química dos aços USI LN 700 e ASTM A572 .....	35
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos aços USI LN 700 e ASTM A572 .....	35
Tabela 5 - Matriz comparativa dos corpos de prova .....	36
Tabela 6 - Valores de setup no robô .....	38
Tabela 7 - Parâmetros <i>weaving</i> utilizados no S-AWP.....	39
Tabela 8 - Dados coletados na soldagem .....	46
Tabela 9 - Pesos dos corpos de prova.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
Ar	Argônio
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
ASM	<i>American Society for Metals</i> (Sociedade Americana de Metais)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldagem)
C	Carbono
CE	Carbono Equivalente
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CP	Corpo de Prova
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (Soldagem ao Arco Metálico com Proteção Gasosa)
HD-Pulse	<i>Hyper Dip Pulse</i> (Pulso Hiper Mergulhador)
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i> (Alta Resistência Baixa Liga)
MAG	<i>Metal Active Gas</i> (Soldagem ao Arco Metálico com Proteção Gasosa Ativa)
MB	Metal Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> (Soldagem ao Arco Metálico com Proteção Gasosa Inerte)
Mn	Manganês
Nb	Nióbio
O <sub>2</sub>	Gás Oxigênio
P	Fósforo
RM	Rendimento Metálico
S	Enxofre
S-AWP	<i>Super Active Wire Feed Process</i> (Processo de Alimentação de Arame Superativo)
Si	Silício
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> (Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido)
TD	Taxa de Deposição
Ti	Titânio
V	Vanádio
ZTA	Zona Térmica Afetada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	LOCAL DO ESTUDO .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	OBJETIVO GERAL .....	14
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW .....	15
2.2	MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	17
<b>2.2.1</b>	<b>Modos naturais de transferência metálica .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Modos controlados de transferência metálica .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Desenvolvimentos recentes nos processos de soldagem por transferência pulsada e controlada .....</b>	<b>24</b>
2.3	CÁLCULO DE ENERGIA DE SOLDAGEM.....	26
2.4	TAXA DE DEPOSIÇÃO .....	28
2.5	SOLDABILIDADE DOS AÇOS .....	29
2.6	AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA .....	31
<b>2.6.1</b>	<b>Soldabilidade dos aços de alta resistência e baixa liga.....</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1	CONDIÇÕES DE ENTRADA DO EXPERIMENTO.....	35
<b>3.1.1</b>	<b>Preparação da matéria prima e confecção dos corpos de prova.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Soldagem robotizada.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Variáveis dinâmicas do estudo .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Parâmetros fixos do estudo.....</b>	<b>39</b>
3.2	ELEMENTOS DE SAÍDA DO EXPERIMENTO.....	40
<b>3.2.1</b>	<b>Cálculo de energia de soldagem .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Cálculo de taxa de deposição.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Cálculo de rendimento metálico.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Realização da análise metalográfica .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Realização do perfil de dureza Vickers .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Leitura da forma de onda .....</b>	<b>43</b>

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>45</b>
4.1	RESULTADO DA SOLDAGEM .....	45
4.2	MEDIÇÃO DA ENERGIA DE SOLDAGEM .....	46
4.3	MEDIÇÃO DA FORMA DE ONDA .....	47
4.4	MEDIÇÃO DA TAXA DE DEPOSIÇÃO.....	48
4.5	MEDIÇÃO DO RENDIMENTO METÁLICO .....	50
4.6	MEDIÇÃO DO PERFIL DE DUREZA VICKERS .....	50
4.7	MEDIÇÃO DA MACROGRAFIA.....	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DAS MACROGRAFIAS.....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente, a qual pode ser realizada através de um processo denominado *Gas Metal Arc Welding* (GMAW – Soldagem ao Arco Metálico com Proteção Gasosa), que é a união de peças metálicas produzidas pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu consumível, e a peça de trabalho (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Com a evolução dos processos de soldagem, os equipamentos de soldagem necessitam cada vez mais de sistemas que envolvem segurança, produtividade, redução de custos operacionais e qualidade. De acordo com Costa et al. (2012) assim surge a necessidade de buscar novas tecnologias de soldagem, que estão relacionadas principalmente com o desenvolvimento de novas fontes de soldagem com controle eletrônico do processo, buscando estabilidade e qualidade do filete de solda.

Essas tecnologias de soldagem buscam monitorar a forma de onda da corrente na saída da fonte de solda, conseqüentemente buscando modos de transferências controlados. Estes modos de transferências objetivam menor aporte térmico, baixa incidência de respingos e melhor estabilidade de arco (COSTA et al., 2012).

Além das condições de soldagem citadas acima, há os desafios de novas ligas metálicas que vêm ganhando espaço nas aplicações estruturais, como por exemplo os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), que permitem redução de peso estrutural sem comprometer a rigidez (SCHEIDMANDEL, 2013).

De acordo com Haupt et al. (2018), para melhorar a aplicação em aços de alta resistência, a indústria tem trabalhado nos últimos anos para melhorar a qualidade e superar as limitações dos processos convencionais GMAW. Um dos avanços tecnológicos foi o desenvolvimento do arco pulsado. Esse modo de transferência, e suas variações, trazem benefícios aos processos produtivos como significativas reduções de aporte térmico (se comparado com a transferência spray), e aumento na taxa de deposição, oferecendo vantagens produtivas as empresas.

Um dos últimos recursos de soldagem com transferência controlada foi desenvolvido pela japonesa Panasonic em março de 2017, denominado *Super Active Wire Feed Process* (SAWP – Processo de Alimentação de Arame Superativo), que diferentemente dos processos pulsados, trabalha no modo de transferência de curto-circuito controlado pela alimentação do arame. A fabricante garante excelente desempenho em altas velocidades de soldagem e

aplicações em aços de alta resistência, além do baixo aporte térmico (PANASONIC BUSINESS, 2017).

Diante destas condições, têm-se a oportunidade de avaliar o comportamento em aços de alta resistência quando estes passam por processos de soldagem com os modos de transferência metálica controlada.

## 1.1 LOCAL DO ESTUDO

O presente trabalho foi desenvolvido em parceria com a Powermig, empresa com 15 anos de atuação no mercado e consolidada no cenário nacional em soluções de soldagem robotizada. A empresa conta com a parceria da marca Panasonic no qual já instalou mais de 520 sistemas robotizados e atualmente dispõe de aproximadamente 95 funcionários.

Os corpos de prova foram realizados no laboratório de soldagem e desenvolvimento da empresa, o qual dispõe dos recursos de soldagem necessários para o estudo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Levando em consideração a sensibilidade a ciclos térmicos dos aços ARBL e as crescentes demandas produtivas das empresas, os processos atuais têm exigido cada vez maior velocidade de deslocamento, resistência mecânica e penetração nas juntas soldadas, evidentemente buscando incrementos de produção e qualidade ao produto final.

Processos de curto-circuito controlado, por apresentarem menor aporte térmico, geralmente são aplicados e estudados em chapas finas, ou seja, são pouco explorados em aplicações com maiores espessuras. Uma novidade no âmbito da solda no que tange aos processos controlados e não se encontra nas bibliografias atuais é a tecnologia robotizada S-AWP, a qual permite abrir caminhos a serem investigados dentro das transferências controladas e aplicada a soldagem de chapas de maiores espessuras.

Há diversas técnicas para buscar os processos adequados na soldagem de ARBL, e conforme visto na introdução deste trabalho, tanto o modo de transferência pulsado e suas variações como a tecnologia de curto-circuito controlado S-AWP garantem bom desempenho nestas aplicações. Esse questionamento motiva o autor e a empresa parceira a aprofundar-se no tema, visto que comumente as dúvidas entre as vantagens e desvantagens das tecnologias citadas são levantadas pelo mercado a qual a empresa atua.

À frente deste contexto, é conveniente a comparação destes modos, objetivando penetrações admissíveis, maiores velocidades de soldagem e análise do perfil de dureza na zona afetada termicamente (ZTA). As análises quantitativas citadas serviram para definir o processo mais adequado para as aplicações estudadas. Os benefícios das conclusões ao final deste estudo foram de grande valia para a indústria metal mecânica, pois a partir dos critérios de análise técnica estabelecidos, pode-se prever a viabilidade econômica de cada processo, trazendo competitividade para o mercado.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Concluir as diferenças sobre o efeito de duas transferências controladas GMAW buscando identificar a combinação de parâmetros que obtenha a maior velocidade de soldagem e penetração aplicados em chapas de alta resistência mecânica.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de atender o objetivo geral, foram definidos os objetivos específicos a seguir:

- a) avaliar perfil de microdureza em função da energia de soldagem e do carbono equivalente;
- b) comparar as taxas de deposições entre os modos de transferência estudados;
- c) confrontar penetração de acordo com os processos de soldagem por meio de ensaio metalográfico;
- d) analisar as formas de onda dos modos de transferência com o uso de *software*;

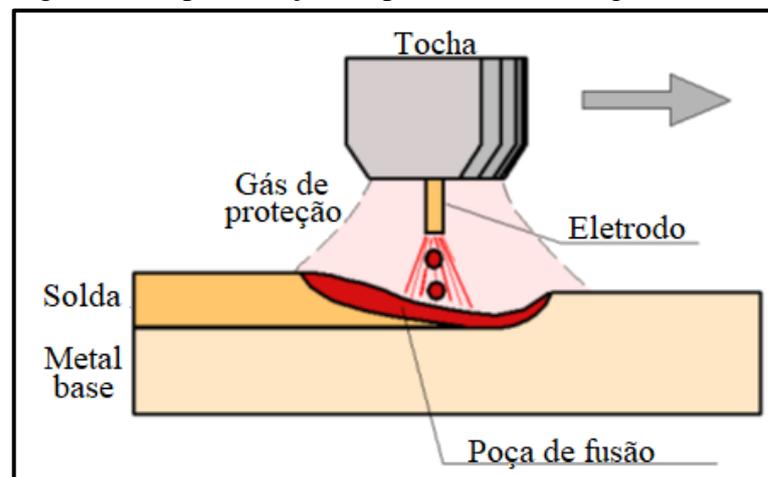
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir da ideia de estudo a ser realizado, será apresentada a seguir a fundamentação teórica, no qual foram esclarecidas as referências teóricas sobre soldagem GMAW e seus diversos modos de transferência. Foram abordados também a soldabilidade dos aços comuns e dos aços de alta resistência e baixa liga, além de certos critérios de engenharia que envolvem o processos de soldagem, como carbono equivalente, energia de soldagem e taxa de deposição.

### 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

O processo GMAW é uma técnica de soldagem que utiliza o arco elétrico como fonte de calor e tem como objetivo, fundir as peças a serem unidas e o eletrodo. O arco elétrico é mantido através de alimentação contínua do eletrodo nu e protegido por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011; WAINER, 1992). A Figura 1 ilustra o processo GMAW.

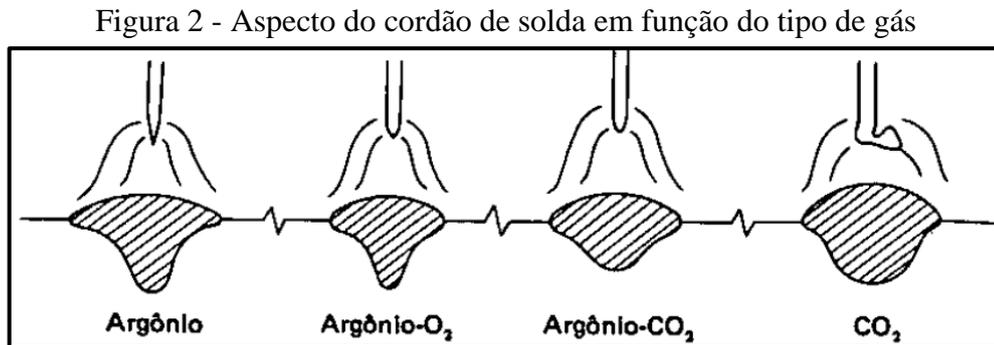
Figura 1 - Representação do processo de soldagem GMAW



Fonte: adaptado de Modenesi (2012)

A proteção do arco e da poça de fusão é feita através de um gás ou mistura de gases. O processo em que há a utilização de gases inertes, como Argônio ou Hélio, é conhecido como *Metal Inert Gas* (MIG – Soldagem ao Arco Metálico com Proteção Gasosa Inerte) e este não tem a capacidade de reagir com o material soldado. Caso haja a presença ou mistura de gases ativos, como gás carbônico ou oxigênio, o processo se denomina *Metal Active Gas* (MAG – Soldagem ao Arco Metálico com Proteção Gasosa Ativa), estes por sua vez reagindo com o metal base. (MARQUES; MODENESI; SANTOS, 2012).

Segundo Bracarense (2013) os gases além de proteger o arco elétrico da atmosfera, contribuem ainda para o modo de transferência, a penetração e geometria do cordão de solda, velocidade de soldagem e as propriedades mecânicas do metal de solda. Além do gás de proteção, o processo GMAW conta ainda com outras variáveis de processo, como: corrente de soldagem, polaridade, tensão de arco, velocidade de deslocamento, diâmetro e composição do eletrodo, tipo e orientação da junta. A Figura 2 exemplifica as diferentes geometrias dos cordões em função dos gases.



Fonte: Okumura; Taniguchi (2011)

Para Gimenes Junior e Ramalho (2013), a mistura mais utilizada é a de argônio com CO<sub>2</sub> (ou com O<sub>2</sub>) com alto percentual de Ar para a soldagem de aços ao carbono. Com esta mistura é possível obter a (a) inertização do arco, poça de fusão, arame e zona fundida, (b) o molhamento adequado devido ao pequeno percentual de gás ativo, e (c) a mínima repulsão da gota o que propicia a transferência em modo spray. Segundo os mesmos autores, ainda é possível soldar aços até com CO<sub>2</sub> puro. O CO<sub>2</sub> atua diretamente na tensão superficial fazendo com que a gota aumente a dimensão e tenha massa suficiente para ser mais facilmente repelida no arco elétrico.

As vantagens do GMAW que podem se destacar em relação ao eletrodo revestido, processo conhecido como *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW – Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido), são as altas taxas de deposição e conseqüentemente elevada produtividade, não há formação de escórias, a versatilidade de soldagem em todas as posições, possibilidade de soldagem em ampla faixa de espessuras e materiais, a menor habilidade do soldador e podem ser facilmente automatizadas. As limitações do GMAW ficam por conta da sensibilidade de regulagem dos parâmetros elétricos, equipamentos mais caros e complexos e proteção do arco é sensível a correntes de ar (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011; WAINER, 1992; MARQUES; MODENESI; SANTOS, 2012).

De acordo com Bracarense, Bastos Filho, Felizardo e Rogana (2002), o processo GMAW é o processo de soldagem com eletrodo sólido contínuo sob proteção gasosa mais utilizado em robotização atualmente. A robotização de um processo produtivo tem vários benefícios: incremento de produtividade, redução dos custos operacionais, aumento da qualidade e alto grau de confiabilidade dos filetes de solda.

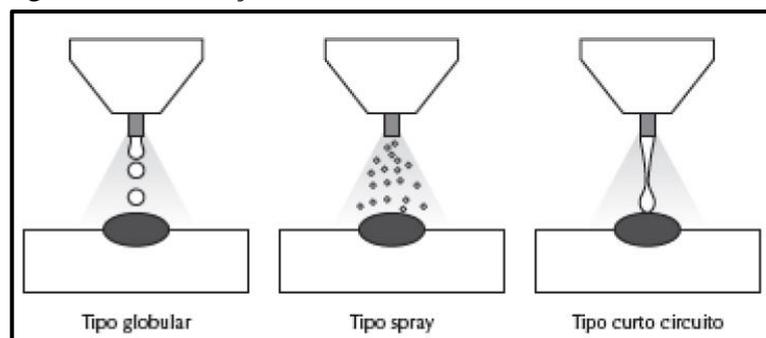
## 2.2 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Os modos de transferência metálica descrevem a maneira pela qual o metal, em gotas, é transferido do arame para a poça de fusão através da coluna de arco.

### 2.2.1 Modos naturais de transferência metálica

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011), há três formas simplificadas de transferência metálica: curto-circuito, globular e spray. Elas podem ser definidas ou alteradas principalmente pelo gás de proteção, diâmetro e composição do eletrodo e a faixa de parâmetros de soldagem utilizados no processo. A Figura 3 expõe de maneira simples a diferença entre os 3 modos citados, os quais detalha-se a seguir.

Figura 3 - Diferença entre os modos de transferência naturais

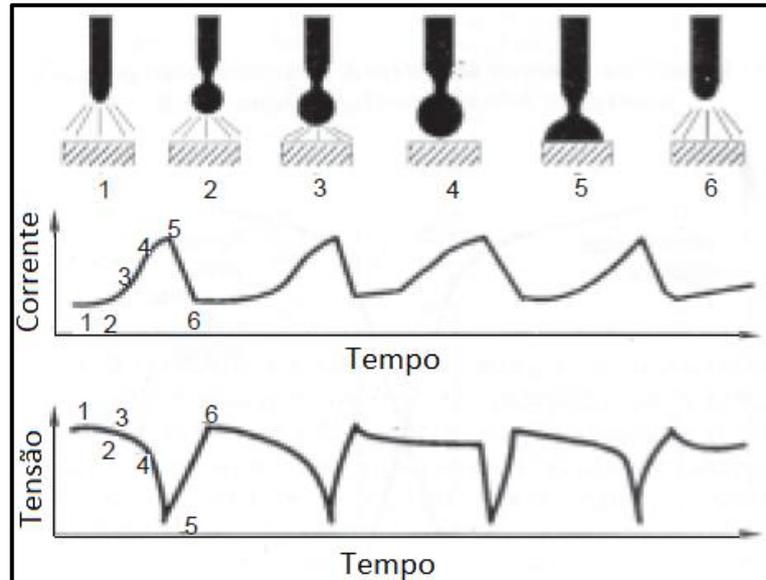


Fonte: Silveira (2016)

- a) **transferência curto-circuito:** a transferência por curto-circuito ocorre quando se usam baixos valores de tensão e corrente. Esse método produz uma poça de fusão pequena e de rápido resfriamento, que geralmente é usada na união de peças de pequena espessura, quando baixa energia de soldagem é necessária. A Figura 4 mostra que uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo e vai aumentando de diâmetro, até tocar na poça de fusão, sendo rapidamente atraída para esta, como

consequência da ação da tensão superficial. A imagem também detalha o comportamento da tensão e corrente em ao longo do tempo, ou seja, percebe-se o aumento da corrente, conforme cresce a gota e a queda brusca quando ela se desprende do eletrodo. Este modo de transferência caracteriza-se por uma grande instabilidade no arco, podendo apresentar a formação intensa de respingos.

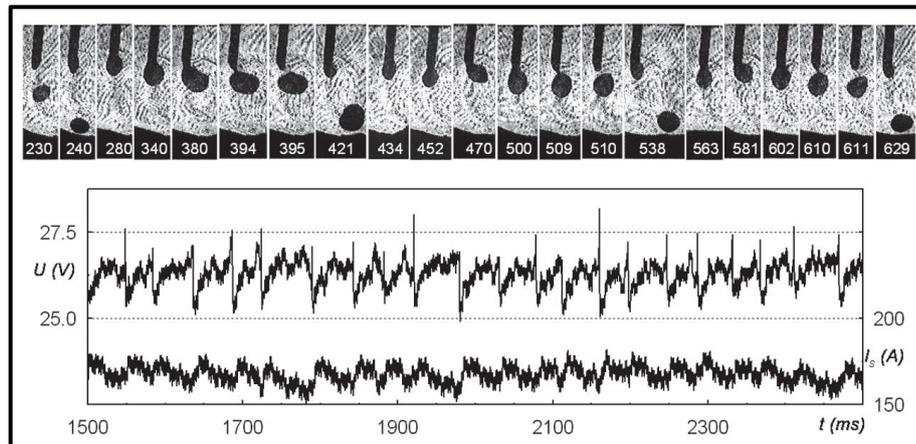
Figura 4 - Ilustração e gráfico de corrente e tensão no processo por curto-circuito



Fonte: adaptado de Bracarense (2013)

- b) **transferência globular:** a transferência globular ocorre com valores intermediários de tensão e corrente de soldagem e resulta em arco mais estável que no caso anterior, contudo, a transferência é mais caótica e imprevisível. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta, mas, em geral, o processo se identifica por gotas maiores que o diâmetro do eletrodo. Como gotas de metal fundido se transferem principalmente por ação da gravidade, a transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado. A Figura 5 mostra a transferência globular com gotas maiores que o diâmetro do eletrodo sendo transferidas de forma desordenadas e a variação (caótica) típica da corrente e tensão em função do tempo.

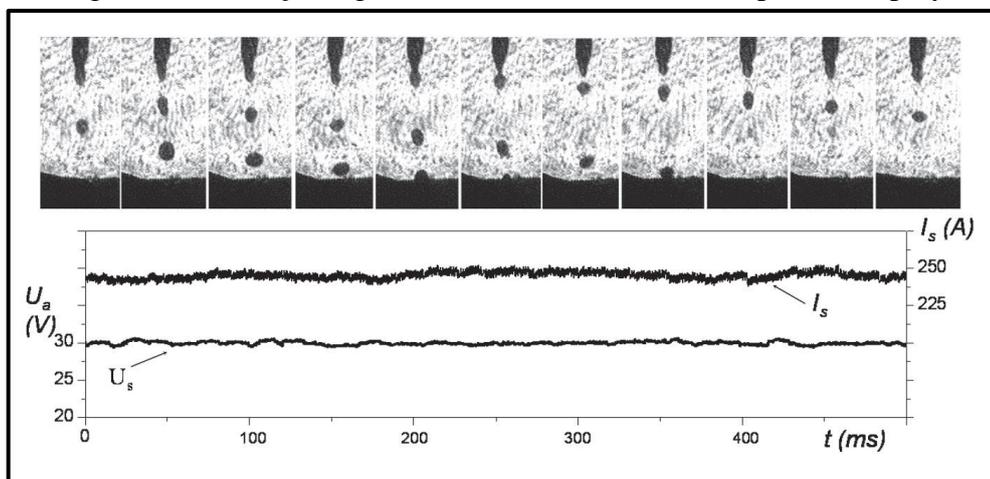
Figura 5 - Ilustração e gráfico de corrente e tensão no processo globular



Fonte: Scotti e Ponomarev (2008)

- c) **transferência spray:** à medida que se aumenta a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a peça diminui, até que, acima de uma certa faixa relativamente estreita de valores, conhecida como "corrente de transição", há uma mudança brusca no modo de transferência, que passa de globular para "spray". Neste modo, a transferência resulta em um fluxo altamente direcionado de gotas discretas (menores que o diâmetro do eletrodo) que são aceleradas por forças do arco a velocidades que vencem a força gravitacional, conforme revela a Figura 6. Nota-se além disso, certa linearidade da corrente e tensão, evidenciando um arco mais estável se comparado às transferências de curto-circuito e/ou globular. Devido a isto o processo pode ser utilizado em qualquer posição, sob certas condições.

Figura 6 - Ilustração e gráfico de corrente e tensão no processo spray



Fonte: Scotti e Ponomarev (2008)

Simplificando: em correntes baixas o GMAW opera em transferência por curto-circuito, enquanto em correntes médias a transferência é globular. Quando a corrente é aumentada, o processo transita para o modo de pulverização (spray) (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011; PRAVEEN; YARLAGADDA; KANG, 2005).

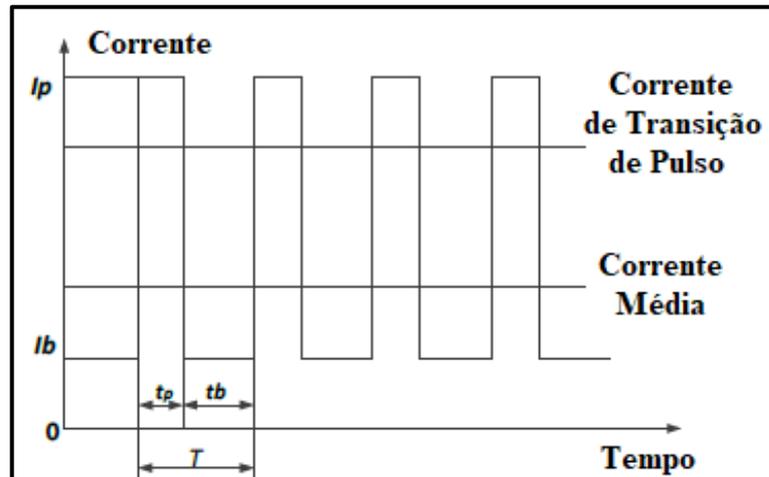
### 2.2.2 Modos controlados de transferência metálica

Em um sistema de soldagem, as principais fontes de distúrbios que precisam de controle e ajustes constante são os parâmetros de soldagem. Com o aumento do uso de automação em sistemas de soldagem, cresceu necessidade de sistema de controle automático para alcançar melhor qualidade e controle dos distúrbios (PRAVEEN; YARLAGADDA; KANG, 2005).

De acordo com o mesmo autor, para obter a transferência controlada durante a soldagem, é essencial que a taxa de alimentação do arame seja equilibrada pela taxa de queima do mesmo. Esse controle é chamado de sinérgico, e basicamente definido de tal forma que ao alterar a corrente (ou taxa de alimentação de arame), todos os demais parâmetros se modificam automaticamente.

- a) **transferência pulsada:** A transferência pulsada está disponível há algum tempo (meados de 1960) e é a transferência controlada mais usada. Ela é obtida através pulsação da corrente de soldagem em dois patamares, um inferior à corrente de transição (corrente de base) e outro superior a esta (corrente de pico), de modo que durante o período de tempo em que a corrente é baixa uma gota se forma e cresce na ponta do arame e esta é transferida quando o valor da corrente salta para o valor elevado. A Figura 7 representa esse processo. É reconhecida pelos baixos níveis de respingo, boa capacidade posicional de soldagem, além de ser aceita por uma ampla gama de materiais (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011; NORRISH, 2017).

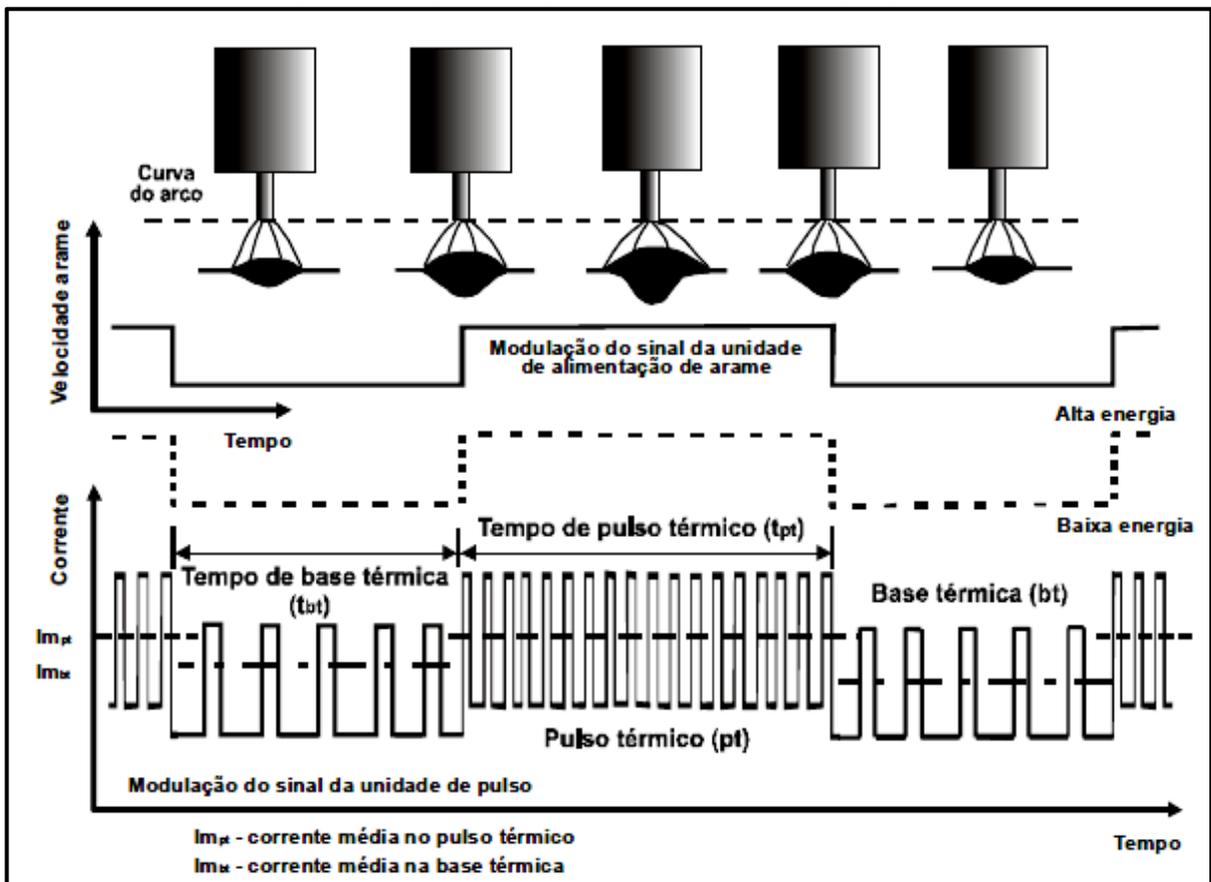
Figura 7 - Esquematização do processo pulsado



Fonte: adaptado de Xue et al (2019)

- b) **transferência duplo pulso:** Buscando maior controle da poça de fusão e maior capacidade de produção do processo GMAW pulsado, surgiu a transferência controlada duplo pulsada, ou também conhecida como pulsado com pulsação térmica. A soldagem GMAW de pulso duplo é influenciado por dois níveis de pulsação, simultaneamente, ou seja, pulsos de alta frequência e pulsos de baixa frequência (pulso térmico). A função do pulso de corrente de alta frequência é controlar o comportamento de transferência de gotículas, visando obter penetração da solda. A principal função da baixa frequência (pulso térmico) é obter uma série de pulsos regulares para agitar a poça de fusão. Entre as vantagens em relação aos demais modos de transferências já citados do GMAW, pode-se destacar a aplicação para todas as posições de soldagem, os duplos pulsos reduzem a entrada de calor (aporte térmico), e por agitarem fortemente a poça de fusão, reduzem porosidade e sensibilidade a fissuras, e melhorando a microestrutura, propriedades mecânicas e geometria do filete de solda. (ZIBEROV; SCOTTI, 2015; LIU; TANG; LU, 2012). A Figura 8 esquematiza o processo de transferência duplo pulso ou pulsação térmica, no qual verifica-se a oscilação da corrente (pulsando) em função do tempo, assim como a de alimentação do arame. Outra diferença está nas frequências de pulso entre a base térmica e o pulso térmico com seus motivos já aclarados.

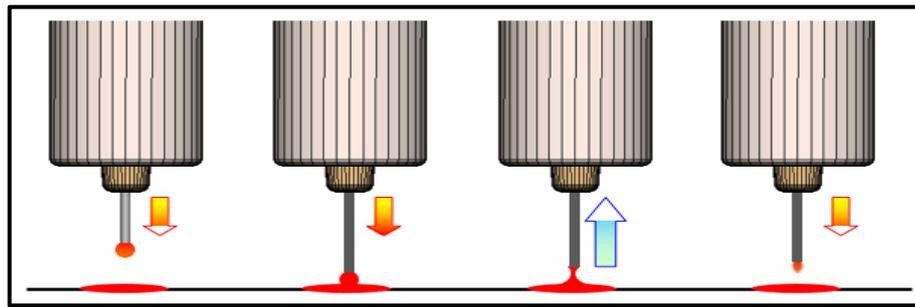
Figura 8 - Representação da transferência duplo pulso



Fonte: adaptado de Barra (2002)

- c) **transferência Super Active Wire Feed Process (S-AWP):** É um processo de integração tecnológica a qual controla a forma de onda e alimentação do arame. O controle da forma de onda controla a corrente e tensão antes e depois do curto-circuito, enquanto o controle de alimentação do arame, de forma sincronizada com a corrente, controla a alimentação do arame, buscando reduzir a geração de respingos no processo de solda. Ou seja, a alternância da alimentação de eletrodo (normal/reversa) para controlar o curto-circuito é feita automaticamente. Considerando que o ciclo inicie com a gota se formando na ponta do arame e toca a poça de fusão (curto-circuito) e após, através do controle de avanço e recuo do arame, o eletrodo é retraído para que ocorra o desprendimento da gota. Esse mecanismo reduz o aporte térmico posto na peça em relação curto-circuito natural e diminuí a agitação na poça de fusão, reduzindo respingos e instabilidades de arco (PANASONIC BUSINESS, 2017). A Figura 9 desenha o ciclo do da tecnologia S-AWP.

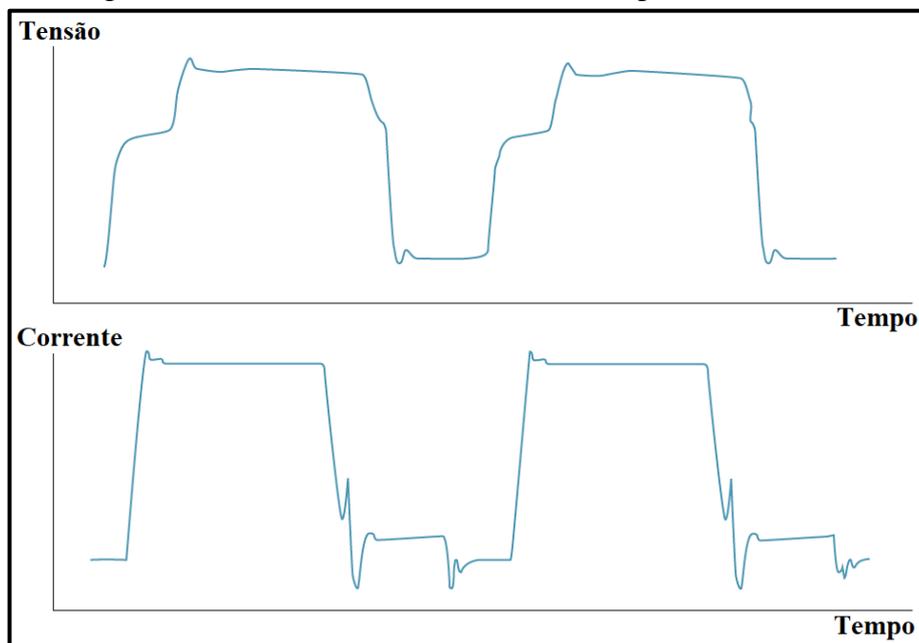
Figura 9 - Ciclo de trabalho do S-AWP



Fonte: adaptado de Panasonic (2017)

A Figura 10 desenha as curvas de saída de corrente e tensão do S-AWP no qual a principal diferença está na queda da tensão quase que instantaneamente com a queda da corrente, diferente do que ocorre no curto-circuito convencional, onde a tensão sobe quando o eletrodo toca a poça de fusão e detecta o curto-circuito (ver Figura 4). Esse sincronismo entre corrente e tensão é essencial para garantir as características já citadas deste processo.

Figura 10 - Gráfico de corrente e tensão do processo S-AWP

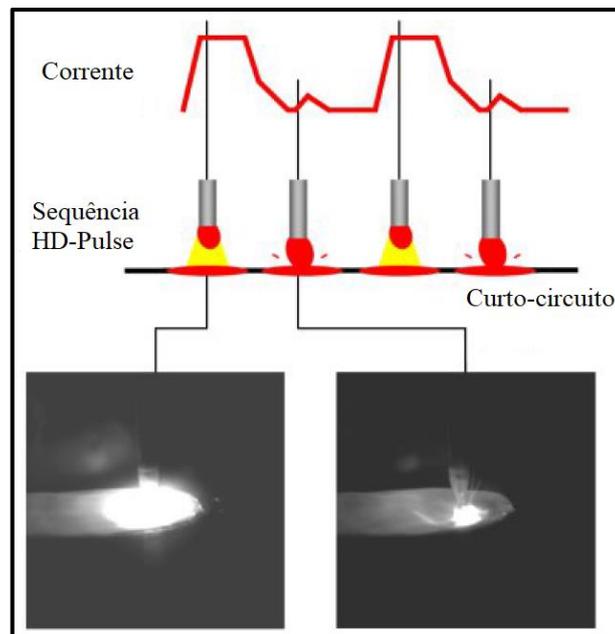


Fonte: adaptado de Ramlab (2021)

- d) **transferência *Hyper Dip Pulse* (HD-Pulse):** O HD-Pulse foi projetado para altas velocidades de soldagem usando a tecnologia patenteada *Dip Pulse* (pulso de mergulho) e abordando o problema de mordedura típica no processo de soldagem pulsado normal. Uma das vantagens da soldagem pulsada é estabilizar o arco e reduzir respingos na faixa de transferência curto-circuito ou globular. Por outro

lado, a desvantagem é a limitação na velocidade de deslocamento. Altas velocidades de deslocamento no pulsado causam mordeduras na junta soldada, devido as características de arcos longos e largos. Como a soldagem por pulsado normal é semelhante à transferência por spray, onde o arame não entra em curto com a poça de fusão durante a soldagem, ela não recebe pressão adicional da tensão superficial causada pelo arame de solda, assim, a tocha não pode alcançar um deslocamento mais rápido. O HD-Pulse resolve estes problemas, pois possui uma seqüência de curto-circuito em sincronia com cada saída de pulso e o arco mais estreito que o pulsado (Figura 11). Essa seqüência ajudará a poça a avançar, alcançando uma velocidade de deslocamento mais rápida (PANASONIC, [20--]).

Figura 11 - Gráfico de corrente e ciclo de trabalho do HD-Pulse



Fonte: adaptado de Panasonic [20--]

### 2.2.3 Desenvolvimentos recentes nos processos de soldagem por transferência pulsada e controlada

O trabalho de Devakumaran, Rajasekaran e Ghosh (2012) comparou os processos pulsado, duplo pulsado e curto-circuito controlado em soldagem de chapas de aço com 12 mm de espessura, proteção gasosa de 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>, com arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e concluíram que para todos os modos de operação, o aumento da velocidade de alimentação de arame, está diretamente relacionada ao aumento da corrente de soldagem. Ainda, identificaram uma melhor qualidade da solda do ponto de vista de estabilidade de arco

e geração de respingo no modo curto-circuito controlado.

O estudo de Mvola, Kah e Layus (2018) refere-se a uma revisão das formas de ondas controladas e os efeitos na geometria dos cordões de solda em processos GMAW. O grupo observou que o processo de curto-circuito controlado pode ser usado para aumentar o aporte térmico sem afetar substancialmente a estabilidade do arco. Esse aumento de energia permite aumentar a velocidade de soldagem e, conseqüentemente a produtividade. Já para o processo de pulsação térmica, foi identificado que em determinado momento o arco é forçado e aumenta a pressão na poça de fusão. Os benefícios são perceptíveis na penetração da solda e na microestrutura obtida. Há outras conclusões relacionadas aos outros processos testados, entretanto, destaca-se os que são pertinentes a este estudo, conforme objetivos aclarados no capítulo 1.

O artigo de Hilmy, Supomo e Zubaydi (2019) comparou o processo curto-circuito controlado (RMD – *Regulated Metal Deposition*) com o processo pulsado, na soldagem de aço ASTM A106 com espessura de 12,7 mm em junta de topo com chanfro de 60 graus e arame 1,2 mm de diâmetro. As variações do estudo ficaram em função do gás utilizado e o processo de soldagem, sendo: a) RMD com 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>; b) RMD com 100% CO<sub>2</sub>; c) pulsado com 100% CO<sub>2</sub>. O trabalho comparou os três cenários de diversos aspectos, sendo:

- a) **nível de consistência do cordão de solda:** foi medido baseado nas médias percentuais de altura de penetração na altura de reforço no passe de raiz. O cenário A apresentou 86,3%, o B 76,3% e o cenário C 81,3%;
- b) **penetração:** todos foram aceitos pela norma, contudo, o cenário B apresentou subpreenchimento no passe de raiz;
- c) **nível de respingos:** o cenário A apresentou 3,53%, o B 12,27% e a condição C 5,87%. O cálculo foi realizado através da quantidade de respingos gerados no processo, contados de forma manual e classificados em função do diâmetro. Através do diâmetro e da quantidade de respingos, calculou-se o volume. Com o volume e densidade do aço, teve-se a massa de respingos que dividido pela quantidade de solda depositado gera as taxas acima.
- d) **altura de deposição:** a condição C apresentou 8 mm de espessura, contra 5 mm do processo RMD. Entretanto, todas as variações obtiveram boa fusão entre as chapas;
- e) **duresa:** Os processos com 100% CO<sub>2</sub> apresentaram quase o mesmo valor, na média de 187,91 HV. O maior valor ficou com RMD a 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> sendo 213,5 HV;

Os autores concluíram baseado nos aspectos técnicos e econômicos que o melhor modo de transferência para o processo de união foi o curto-circuito controlado RMD com 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>.

O estudo em questão irá comparar o processo HD-Pulse com o curto-circuito controlado S-AWP, em mesmas condições de operação, as quais serão detalhadas no capítulo 3.

### 2.3 CÁLCULO DE ENERGIA DE SOLDAGEM

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), a energia de soldagem é a quantidade de energia fornecida ao filete de solda por unidade de comprimento da mesma. Esse termo também é conhecido como aporte térmico ou *heat input*. Apesar de ser um parâmetro importante para caracterizar o processo, nem sempre há uma relação direta entre a energia de soldagem e seus efeitos na junta, pois os parâmetros de soldagem (corrente, tensão e velocidade de deslocamento) afetam de modos diferentes a intensidade do arco.

A morfologia e fase do grão, microestrutura e conseqüentemente as propriedades mecânicas da solda podem ser alteradas com variações no aporte térmico. Essas características também podem depender da composição química e microestrutura inicial do metal base (PAL; PAL, 2010).

A relação matemática que expressa a grandeza de energia de soldagem é:

$$E = \eta \cdot \frac{60 \cdot I \cdot V}{v} \quad (1)$$

onde:

E é a energia de soldagem ou quantidade de calor (joules por milímetro) [J/mm];

$\eta$  é a eficiência térmica ou rendimento do processo (adimensional);

V é a tensão do arco (volts) [V];

I é a corrente de soldagem (ampères) [A];

v é a velocidade de soldagem (milímetros por minuto) [mm/min];

A eficiência térmica é o fator para corrigir as perdas de energia que podem ocorrer durante a transferência, como a perda de energia elétrica entre a fonte de soldagem e a peça, perdas pela radiação do arco, pela luz ultravioleta, perdas de convecção para o ar ou gás de proteção, além das perdas de condução térmica na massa da peça, em torno da região da solda

(BELINGA, 2012). A Tabela 1 mostra as faixas de valores de rendimentos térmicos para os processos de solda convencionais.

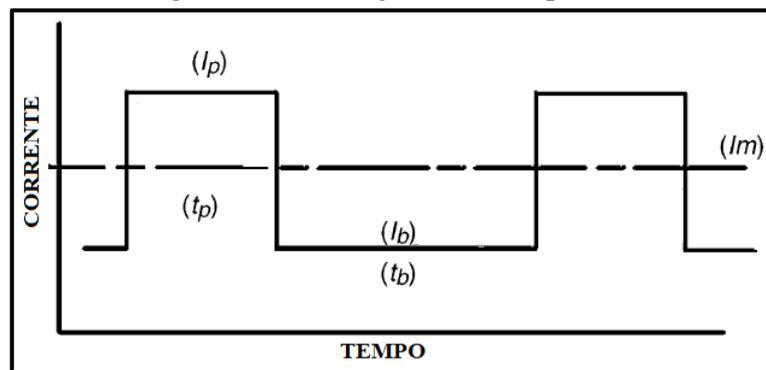
Tabela 1 - Rendimentos térmicos típicos dos processos de soldagem

Processos	TIG	Eletrodo Revestido	GMAW	Arco Submerso	Eletrodo Tubular	Plasma
<b>Rendimento térmico (<math>\eta</math>)</b>	0,55	0,78	0,72-0,78	0,95	0,80	0,66

Fonte: adaptado de Quites (2002)

A Figura 12 ilustra a forma de onda da transferência pulsada convencional e absolutamente retangular, destacando a corrente média ( $I_m$ ) (PRAVEEN; YARLAGADDA; KANG, 2005).

Figura 12 - Ilustração da curva pulsada



Fonte: adaptado de Praveen (2005)

A Equação (2) descreve a corrente média ( $I_m$ ) ilustrada na Figura acima, a qual deve ser utilizada para cálculo do aporte térmico nos processos de transferência controlada. Ela desconsidera os deslocamentos e mudanças que ocorrem durante o processo de solda (PRAVEEN; YARLAGADDA; KANG, 2005):

$$I_m = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \quad (2)$$

onde:

$I_p$  é a corrente de pico [A];

$I_b$  é a corrente de base [A];

$t_p$  é o tempo de pico [s];

$t_b$  é o tempo de base [s];

## 2.4 TAXA DE DEPOSIÇÃO

A taxa de deposição (TD) representa a quantidade de metal depositado sobre a peça por unidade de tempo de arco aberto. A Equação (3) ilustra o cálculo da taxa de deposição, que é a diferença entre a massa inicial e a massa final da peça, antes e após a soldagem respectivamente, dividido pelo tempo necessário para realizar o cordão. A TD age diretamente na produtividade e no custo do processo (ESAB, 2021; MODENESI, 2012).

$$TD = \frac{m_f - m_i}{t_{AA}} \quad (3)$$

onde:

TD é a taxa de deposição [kg/h];

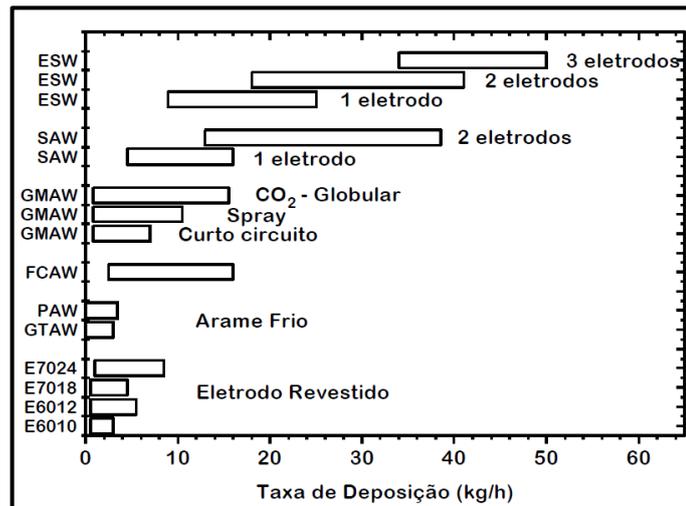
$m_f$  é a massa final da peça (após a soldagem) [kg];

$m_i$  é a massa inicial da peça (anteriormente a soldagem) [kg];

$t_{AA}$  é o tempo de arco aberto [h];

A Figura 13 mostra as taxas de deposição para os diferentes processos de soldagem. Com o processo GMAW é possível atingir a faixa de 1 a 16 kg/h aproximadamente.

Figura 13 - Taxas de deposição comuns de alguns processos de solda

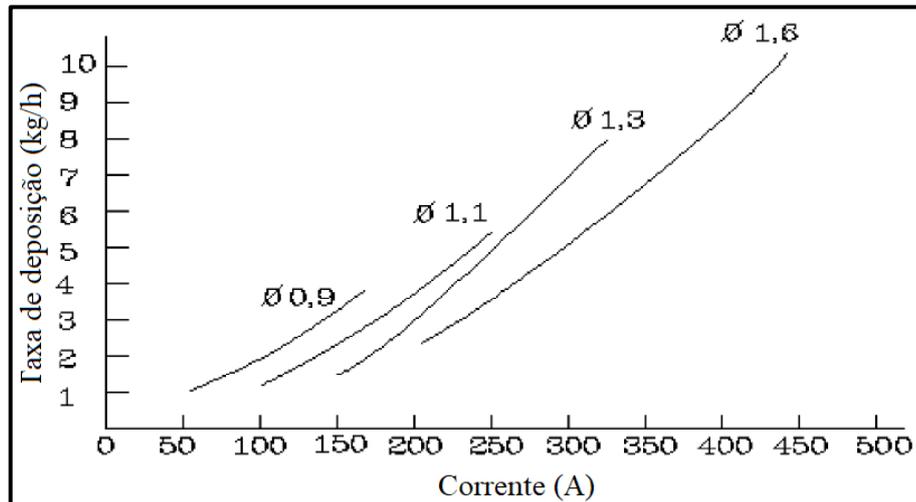


Fonte: Cary (1994 apud Modenesi, 2012)

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), a corrente elétrica é a principal variável que modifica a TD, visto que a mesma também define a velocidade de alimentação do arame, conseqüentemente, quanto maior a corrente, maior a taxa de alimentação de arame e

maior será a quantidade de metal depositado à junta, para um mesmo diâmetro de arame. A Figura 14 esquematiza essa explicação. Outros fatores podem influenciar na TD, como a distância bico de contato peça e o diâmetro do eletrodo.

Figura 14 - Taxa de deposição em função da corrente para diferentes diâmetros de arame



Fonte: adaptado de Machado (1996)

Levando em consideração a análise através da variável “diâmetro do arame”, Machado (1996) concluiu que, para a mesma corrente, diâmetros menores de eletrodo fundem em taxas maiores, conforme ilustrado também na Figura 14. Estudo realizado em aço carbono com proteção gasosa 100% CO<sub>2</sub>.

## 2.5 SOLDABILIDADE DOS AÇOS

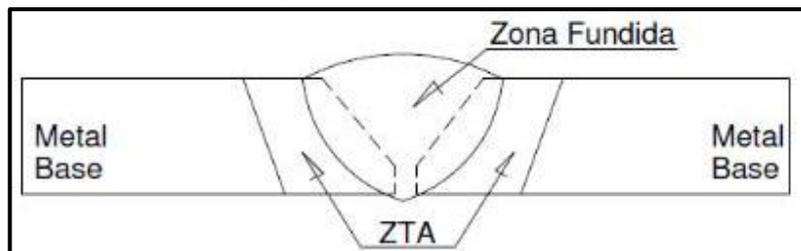
A *American Welding Society* (AWS – Sociedade Americana de Soldagem) (2011) define o termo soldabilidade como a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço.

A definição de soldabilidade dos aços segundo Yourioka (2001) é a disposição em que um aço pode ser soldado, preferencialmente sem defeitos, e o quão satisfatoriamente essa junta desempenha a tarefa à qual é designada, junto com metal base (MB). Em outras palavras, a soldabilidade significa o quanto os aços podem ser soldados com ZTAs menos endurecidas e sem risco de fissuras a frio causadas por hidrogênio.

O calor da soldagem provoca mudanças na microestrutura e propriedades mecânicas na região que é aquecida próxima ao cordão de solda. Essa região é chamada de zona afetada pelo

calor ou zona termicamente afetada (ZTA). A largura dessa região e a microestrutura resultante após a soldagem dependerão da composição e microestrutura prévia do metal base, o pico de temperatura atingido e as taxas de aquecimento e resfriamento do processo global. Este ciclo térmico de aquecimento-resfriamento pode resultar na formação de martensita no metal de solda, na ZTA, ou em ambos (AWS, 2011). A Figura 15 exibe as características de um cordão de solda em corte transversal.

Figura 15 - Desenho esquemático da seção transversal de uma solda



Fonte: Wainer (1992)

Embora o carbono seja o elemento de liga com maior significância na soldabilidade dos aços, os efeitos de outros elementos devem ser levados em conta, e, podem ser estimados igualando-os a uma quantidade equivalente de carbono. Assim, o efeito total da liga pode ser expresso em termos de carbono equivalente (CE). Uma fórmula empírica que pode ser usada para julgar o risco de trincas sob o cordão de solda é (AWS, 2011):

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\%) \quad (4)$$

O CE com valor inferior a 0,4 indica que o aço é insensível à fissuração e a trincas. Se o termo for superior a 0,6, o material é fortemente vulnerável as trincas, exigindo técnicas de soldagem e pré-aquecimento do MB (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Segundo a própria AWS (2011), o teor geral de liga de um tipo de aço determina sua temperabilidade (a taxa de resfriamento mínima necessária para produzir martensita), enquanto o conteúdo de carbono sozinho determina a dureza máxima. Altos níveis de dureza aumentam a suscetibilidade à trinca induzida a frio por hidrogênio, na solda ou na ZTA, assim, o grau de endurecimento é uma consideração importante na avaliação da soldabilidade de um aço ao carbono ou baixa liga.

Resumindo, em outras palavras, a soldabilidade do aço é inversamente proporcional a sua temperabilidade. E, idealmente, uma junta deve apresentar resistência mecânica,

ductilidade, tenacidade, resistências à fadiga e à corrosão uniformes ao longo da solda e similares às propriedades do material adjacente. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

## 2.6 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

A tendência de utilizar estruturas cada vez maiores, tem levado os engenheiros a considerar o emprego de aços cada vez mais resistentes, procurando evitar o uso de estruturas cada vez mais pesadas. Tais ponderações se aplicam em estruturas fixas, como de edifícios ou pontes, mas igualmente e principalmente em estruturas móveis, no setor de transportes (indústria automobilística, ferroviária, aeronáutica etc.), onde o maior interesse se concentra na redução do peso-morto da estrutura. Ainda podem ser aplicados em equipamentos para movimentação de terras e outras aplicações de maquinário para construção. (CHIAVERINI, 1996).

Segundo Gorni (2008), o exorbitante aumento no preço dos combustíveis na primeira crise do petróleo em 1973, fez com que a indústria automobilística buscasse em seus projetos a redução de peso dos automóveis, reduzindo o consumo de combustível. As alternativas foram a diminuição do seu tamanho e do uso de materiais mais leves, como plásticos e alumínio. Já as siderúrgicas, tiveram que buscar dentro da ciência metalúrgica, novos meios para produzir aços mais resistentes, que permitissem a fabricação de componentes com os mesmos níveis de resistência mecânica, mas com menor quantidade de material. Surgiram então os chamados aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) (*HSLA – High Strength Low Alloy*).

De acordo com a AWS (2011), os aços ARBL são concebidos com pequenas quantidades de elementos de liga, para oferecer maior resistência mecânica, melhor tenacidade e soldabilidade e, maior resistência a corrosão em ambientes específicos em alguns casos, se comparados aos aços carbono comum.

Seu baixo teor de carbono e ligas, por sua vez, contribui à excelente soldabilidade da maioria dos aços ARBL. As principais adições de ligas são o nióbio e vanádio, adicionados isoladamente ou em combinação em quantidades até cerca de 0,10%. Para algumas aplicações o níquel ou molibdênio podem ser usados para complementar a formulação da liga, principalmente em seções mais espessas ou necessidade de resistências mais altas. Podem ainda conter titânio em quantidades de até 0,025% para se combinar com o nitrogênio residual, suprimindo assim o engrossamento do grão na ZTA e melhorando a resistência geral (AWS, 2011).

A Tabela 2 traz os intervalos de elementos químicos que podem estar presentes nos aços ARBL.

Tabela 2 - Intervalos de elementos químicos em aços ARBL

<b>Elemento</b>	<b>Faixa</b>	<b>Elemento</b>	<b>Faixa</b>
Carbono (C)	0,28 a 0,60%	Molibdênio (Mo)	0 a 0,65%
Fósforo (P)	0,01 a 0,12%	Zircônio (Zr)	0 a 0,12%
Silício (Si)	0,01 a 0,90%	Alumínio (Al)	0 a 0,20%
Manganês (Mn)	0,35 a 1,60%	Enxofre (S)	0 a 0,03%
Cobre (Cu)	0 a 1,25%	Titânio (Ti)	0 a 0,05%
Cromo (Cr)	0 a 1,80%	Boro (B)	0 a 0,005%
Níquel (Ni)	0 a 5,25%	Nióbio (Nb)	0 a 0,10%

Fonte: adaptado de Chiaverini (1996)

De uma maneira geral, os aços ARBL são reforçados por uma combinação de refinamento de grãos de ferrita, endurecimento por precipitação e fortalecimento subestrutural. O fortalecimento subestrutural ocorre através das matrizes de deslocamento da ferrita e os subgrãos interagem para aumentar a resistência ao escoamento. Por causa desses mecanismos alternativos de aumento de resistência, esse tipo de aço não depende de produtos de transformação, como microestruturas perlíticas, bainíticas ou martensíticas. As tensões de escoamento típicas variam de 290 MPa a 760 e a resistência à tração estão na faixa de 410 MPa a 830 MPa (AWS, 2011).

### **2.6.1 Soldabilidade dos aços de alta resistência e baixa liga**

Conforme a *American Society for Metals* (ASM – Sociedade Americana de Metais) (1990), os aços ARBL são prontamente soldáveis por quaisquer processos de soldagem já utilizados para aços estruturais ao carbono comum, visivelmente, inclui-se o GMAW. Como o teor de carbono destes aços são baixos, eles apresentam características de endurecimento na ZTA muito parecidas com às dos aços simples com baixo teor de carbono. Evidentemente, eles

não endurecem na ZTA como os aços ao carbono simples com o mesmo desempenho em termos de resistência mecânica, já que nesta família os percentuais de carbono são superiores. O pré-aquecimento às vezes pode ser necessário, mas o pós-aquecimento é praticamente indispensável.

Ao soldar materiais sensíveis ao calor, como aços de alta resistência, uma das técnicas que podem ser usadas é a redução de aporte térmico dado ao metal base, buscando reduzir os danos na microestrutura original da liga (SANTOS; PISTOR; GERLICH, 2017).

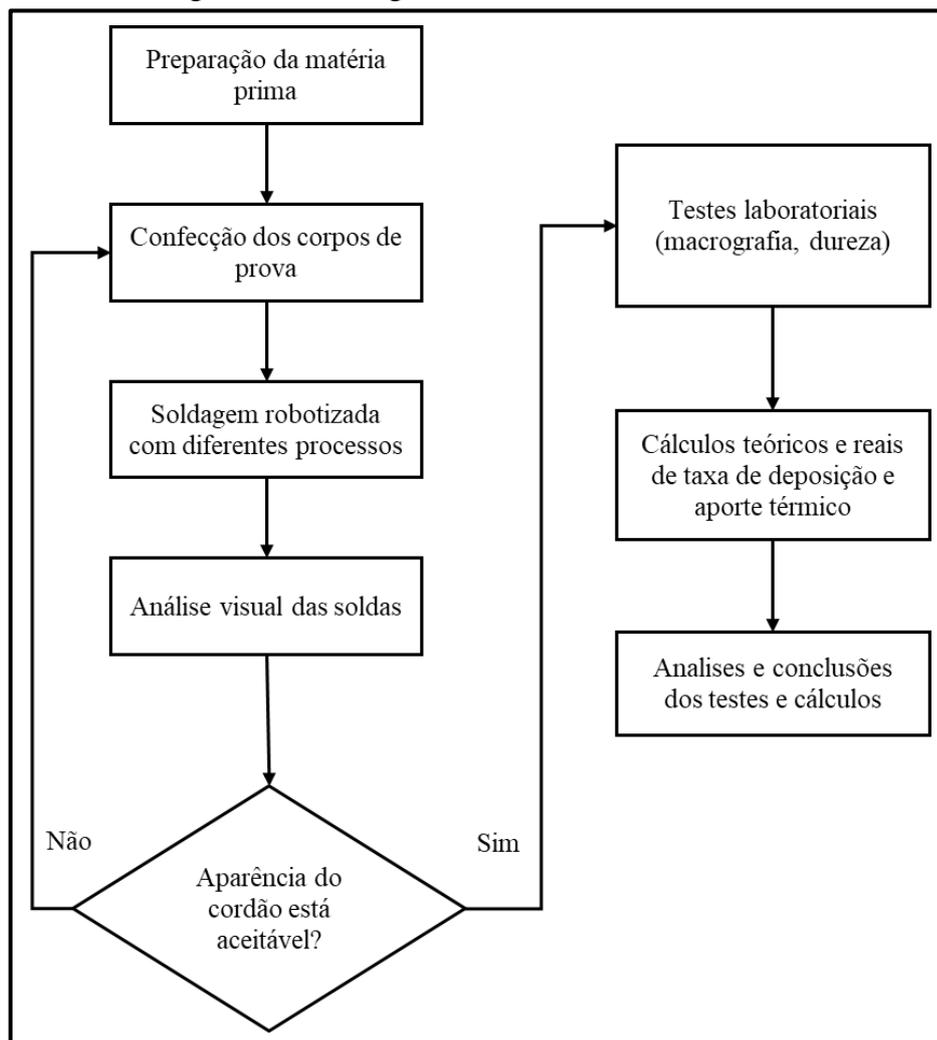
De acordo com Modenesi (2011) o maior problema de soldabilidade destes aços é a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio, já aclarado anteriormente neste trabalho para quaisquer aços comuns. Outros problemas incluem a perda de tenacidade na ZTA e/ou na zona fundida, (a ASM usa o termo endurecimento). Isso se dá geralmente devido a formação de microestruturas grosseiras e quando utilizado soldagens com elevado aporte térmico. Quando empregado processos com baixo aporte térmico, a cautela deve ser com a formação de martensita.

Para a soldagem desses materiais pode ser aplicados arames das classes 70, 80, 90, 100, 110 e 120 e essa escolha depende do tipo de junta e aplicação do produto. Para a utilização de metais de adição com resistência mecânica menor que a resistência do metal base, usa-se o termo *undermatching*. Ao utilizar eletrodos com a característica *undermatching*, os quais são mais dúcteis que o metal base, é possível reduzir a tendência a trincas na solda e também no metal base. (VELAZQUEZ, 2022)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram apresentados os materiais, ferramentas e equipamentos necessários para que o estudo proposto fluísse de forma satisfatória. Também foram descritos os procedimentos de análise, medições e coleta de dados. A Figura 16 esquematiza através de um fluxograma as etapas macro do estudo.

Figura 16 - Fluxograma das atividades realizadas



Fonte: o Autor (2021)

A etapa de análise visual do cordão de solda teve o propósito de avaliar se a aparência está dentro dos parâmetros desejados, como ausência de defeitos superficiais (mordeduras, poros e trincas), e se a geometria (tamanho de perna) está correta.

### 3.1 CONDIÇÕES DE ENTRADA DO EXPERIMENTO

#### 3.1.1 Preparação da matéria prima e confecção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados em dois aços ARBL, sendo o USI LN 700 e o ASTM A572 grau 50 tipo 4, ambos do fabricante USIMINAS. As Tabelas 3 e 4 apresentam as composições químicas e propriedades mecânicas de ambos os materiais, os quais foram fornecidos nas condições de chapas laminadas a quente e não sofreram quaisquer tratamentos anteriores a solda.

Tabela 3 - Composição química dos aços USI LN 700 e ASTM A572

<b>Elemento Químico</b>	<b>USI LN 700</b>	<b>ASTM A572 grau 50 tipo 4</b>
<b>C</b> (máx. %)	0,12	0,23
<b>Si</b> (máx. %)	0,60	0,40
<b>Mn</b> (máx. %)	2,10	0,50 – 1,35
<b>P</b> (máx. %)	0,025	0,04
<b>S</b> (máx. %)	0,015	0,05
<b>Al</b> (máx. %)	0,015	0
<b>Nb</b> (máx. %)	0	0,003 – 0,015
<b>Mo</b> (máx. %)	0,50	0
<b>V</b> (máx. %)	0,20	0,06
<b>Ti</b> (máx. %)	0	0,006 – 0,04
<b>Fonte</b>	Usiminas (2022)	Usiminas (2021)

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos aços USI LN 700 e ASTM A572

<b>Aço</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Tensão de escoamento (min MPa)</b>	<b>Resistência a tração (MPa)</b>	<b>Alongamento (min %)</b>	<b>Fonte</b>
<b>USI LN 700</b>	2 – 9,53	700	750 – 950	13	Usiminas (2022)
<b>ASTM A572 grau 50 tipo 4</b>	4,57 – 9,53	345	450	16	Usiminas (2021)

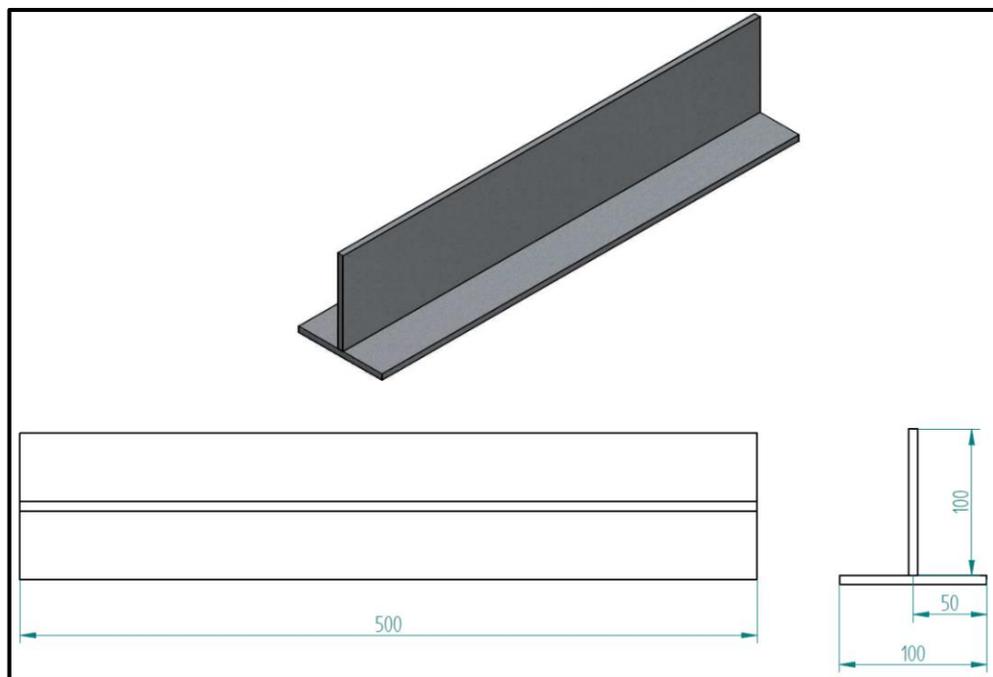
Ao aplicar a equação (4), tem-se o carbono equivalente de cada metal base, levando em conta os valores superiores dos elementos químicos:

$$CE_{USI LN 700} = 0,12 + \frac{2,10}{6} + \frac{0,50 + 0,20}{5} = 0,61$$

$$CE_{A572} = 0,23 + \frac{1,35}{6} + \frac{0,06}{5} = 0,467$$

Além dos dois aços, os CPs foram confeccionados em duas espessuras de chapas para cada metal base, a fim de aumentar a matriz comparativa do estudo, de acordo com a Tabela 5. Os mesmos foram construídos nas dimensões de 500 x 100 mm e montados segundo a Figura 17.

Figura 17 - Projeto dos corpos de prova



Fonte: o Autor (2021)

Tabela 5 - Matriz comparativa dos corpos de prova

Material	ASTM A572 grau 50 tipo 4		USI LN 700	
	Espeçura	1/4"	3/8"	1/4"
Perna de Solda	6 mm	8 mm	6 mm	8 mm
HD-PULSE	CP1	CP3	CP5	CP7
S-AWP	CP2	CP4	CP6	CP8

Fonte: o Autor (2021)

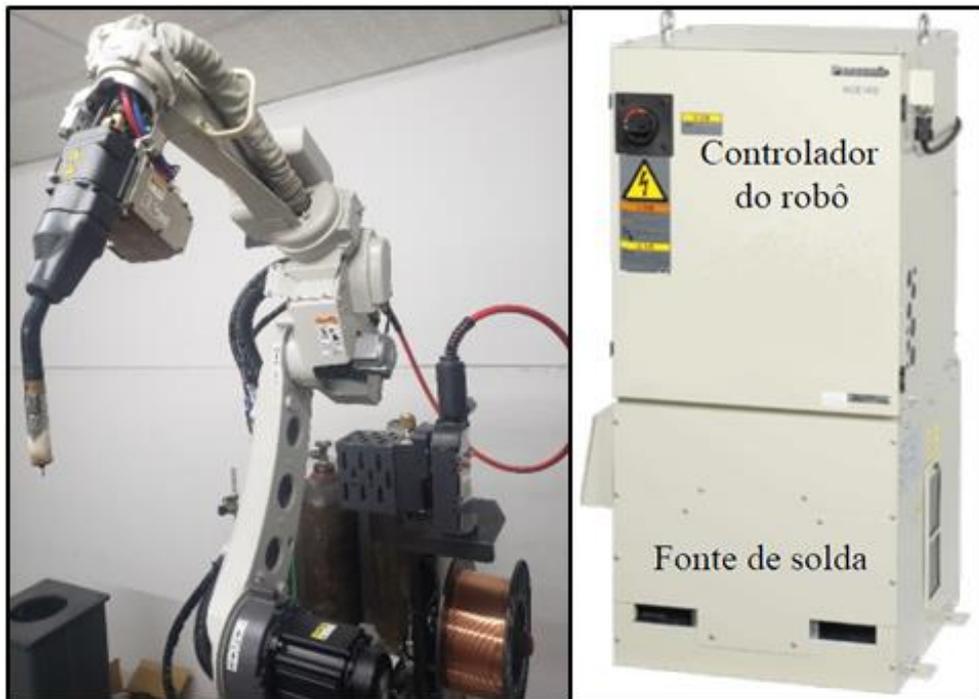
O tamanho de perna foi definido de forma prática através dos parâmetros de cada processo citados acima, objetivando a maior velocidade de deslocamento.

A metodologia de comparação dos resultados é a confrontação do mesmo metal base, com mesma espessura e tamanho de perna com parâmetros e processos diferentes.

### 3.1.2 Soldagem robotizada

O robô utilizado para a soldagem dos corpos de prova é da marca japonesa Panasonic, modelo TM-1400 com fonte de solda de 350 A (Figura 18). Os processos utilizados neste trabalho (S-AWP e HD-Pulse) são duas curvas sinérgicas da fonte de solda denominada comercialmente como TAWERS (*The Arc Welding Robot System*), a qual é totalmente integrada com o controlador do robô. A mudança entre as curvas ocorre via *software* no próprio controle do robô.

Figura 18 - Braço robótico, controlador e fonte de solda Panasonic



Fonte: o Autor (2022)

Os parâmetros elétricos de soldagem foram definidos de forma prática em corpos de prova secundários, de forma intuitiva. Ao atingir os tamanhos de perna conforme descritos na Tabela 5, realizou-se a soldagem dos corpos ilustrados na Figura 17. Os parâmetros de cada corpo de prova seguem na Tabela 6. Os valores de energia de soldagem encontrados foram calculados com base nos parâmetros nominais de corrente e tensão, logo, os resultados são teóricos. Maiores detalhes sobre o cálculo encontram-se no item 3.2.1.

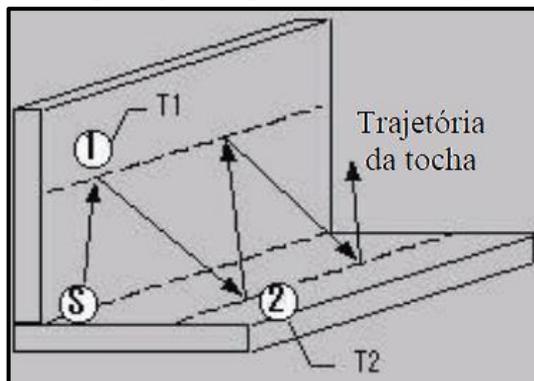
Tabela 6 - Valores de setup no robô

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
<b>Corrente Média (A)</b>	280	280	330	330	280	280	330	330
<b>Tensão Média (V)</b>	26,7	21,5	28,3	21,7	26,7	21,5	28,3	21,7
<b>Velocidade de Deslocamento (mm/min)</b>	450	380	450	350	450	380	450	350
<b>Energia de Soldagem (J/mm)</b>	778	741	971	958	778	741	971	958

Fonte: o Autor (2022)

Devido ao comportamento do processo S-AWP de baixo aporte térmico, foi necessário utilizar os recursos de *weaving* (também comumente conhecido como costura ou tecimento) para que se atingisse a perna necessária. A costura é a oscilação da tocha entre duas amplitudes (pontos 1 e 2) da linha central (ponto S), em determinada frequência e ainda com a possibilidade de “parar” nos pontos de amplitude por uma fração de segundos (T1 e T2). Este conceito pode ser aclarado pela Figura 19.

Figura 19 - Explicação do processo *weaving* na soldagem



Fonte: o Autor (2022)

O recurso foi utilizado somente nos corpos de prova soldados pelo processo S-AWP. A Tabela 7 resume os parâmetros utilizados.

Tabela 7 - Parâmetros *weaving* utilizados no S-AWP

	CP2	CP4	CP6	CP8
<b>Frequência (Hz)</b>	1,5	2,5	1,5	2,5
<b>Amplitude Superior P1 (mm)</b>	3	8	3	8
<b>Amplitude Inferior P2 (mm)</b>	3	6	3	6
<b>Temporizador Superior T1 (s)</b>	0,1	0	0,1	0
<b>Temporizador Inferior T2 (s)</b>	0,1	0	0,1	0

Fonte: o Autor (2022)

Através dos recursos disponíveis no controlador do robô, no momento da soldagem foi possível obter alguns dados reais, como velocidade de alimentação de arame, quantidade de arame utilizado e tempo de arco aberto. Essas informações foram importantes para as demais análises deste trabalho.

### 3.1.3 Variáveis dinâmicas do estudo

Conforme os objetivos descritos no capítulo 1, o confronto foi realizado por meio de dois modos de transferência metálicos controlados, sendo:

- a) ***Hyper Dip Pulse (HD-Pulse)***: processo de curto-circuito controlado pela forma de onda da corrente (pulsada), disponível em fontes de solda da marca Panasonic e seguindo as características teóricas abordadas no Capítulo 2.
- b) ***Super Active Wire Feed Process (S-AWP)***: processo de curto-circuito controlado pela alimentação do arame, disponível em fontes de solda da marca Panasonic, já caracterizado teoricamente no Capítulo 2.

Por se tratarem de curvas distintas, evidentemente, cada processo teve os seus parâmetros de soldagem exclusivos, ou seja, corrente, tensão e velocidade de deslocamento (Tabelas 6 e 7).

### 3.1.4 Parâmetros fixos do estudo

Os dados fixos são aqueles que não foram alterados durante o estudo, ou seja, foram os mesmos para os oito CPs definidos na Tabela 5, e correspondem a:

- a) **tipo de junta:** junta em ângulo.
- b) **posição de soldagem:** horizontal.
- c) **ângulo de trabalho:** 45 a 47 graus.
- d) **ângulo de ataque:** 3 graus negativo.
- e) **arame:** ER70S-6 com  $\varnothing 1,2$  mm.
- f) **distância bico de contato peça:** 15 mm.
- g) **proteção gasosa:** 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>.

## 3.2 ELEMENTOS DE SAÍDA DO EXPERIMENTO

### 3.2.1 Cálculo de energia de soldagem

O cálculo de energia de soldagem foi realizado de forma teórica. O valor teórico foi definido com os valores nominais encontrados de forma prática (e intuitiva), conforme já estabelecido no item 3.1.2 e resumidos na Tabela 6. Utilizou-se a Equação 1 para os devidos cálculos, objetivando relacionar as diferenças entre os processos e o comportamento no filete de solda, como por exemplo na dureza da ZTA.

### 3.2.2 Cálculo de taxa de deposição

A TD foi calculada de acordo com a Equação 3, sendo os CPs pesados antes e após a soldagem (Tabela 9) e o tempo de arco aberto extraído do robô (Tabela 8). O propósito desta variável foi avaliar qual dos processos pode apresentar maior produtividade (maior quantidade de metal depositado por hora), aclarando assim seus respectivos benefícios, caso existirem.

### 3.2.3 Cálculo de rendimento metálico

O rendimento metálico RM (ou de deposição), é a razão entre a massa de metal depositada efetivamente na peça e a massa consumida de arame. Através da TD calculada, e dos dados que foram coletados pelo controlador do robô foi possível calcular este valor. Este dado, assim como a TD, também ajuda identificar o processo com maior produtividade. O RM pode ser calculado através da Equação (5).

$$RM = \frac{TD}{(\pi \cdot d^2/4) \cdot l \cdot \rho} \quad (5)$$

onde:

TD é a taxa de deposição [kg/h];

$d$  é o diâmetro do arame [m];

$l$  é a quantidade de arame utilizado [m];

$\rho$  é a densidade do arame [ $\rho_{aço} = 7800 \text{ kg/m}^3$ ];

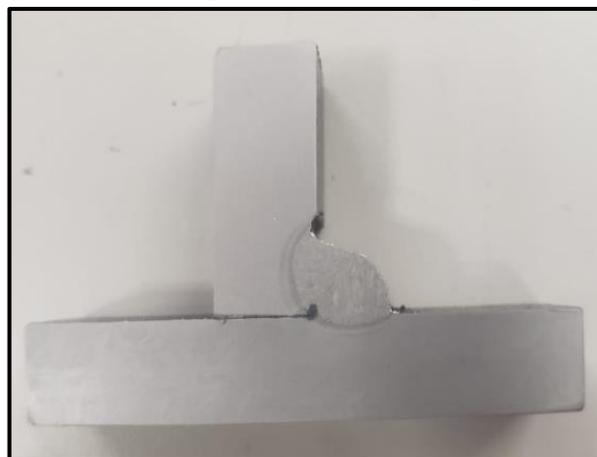
### 3.2.4 Realização da análise metalográfica

A análise macrográfica teve a finalidade de avaliar a penetração da solda no metal e confrontar entre os processos experimentados, além de aferir possíveis defeitos na região da solda, como mordeduras, falta de fusão e aspecto geométrico do cordão.

As etapas da macrografia são: corte, lixamento, ataque e fotografia. O corte teve o propósito de retirar os excessos de metal base até chegar na região do cordão de solda. Após os cortes, iniciou-se o processo de lixamento, que passou por 5 granulometrias de lixa, sendo: 120, 150, 240, 320 e 600. Todas com o objetivo de melhorar o acabamento e retirar os riscos. Essas etapas seguiram a norma ASTM E3 que descreve os métodos de preparação para ensaios metalográficos.

Após, a peça foi colocada em recipiente com solução de 5% de ácido nítrico em álcool (nital) por aproximadamente 1,5 minutos. A Figura 20 demonstra uma amostra com essa etapa já findada e de acordo com a norma ASTM E340.

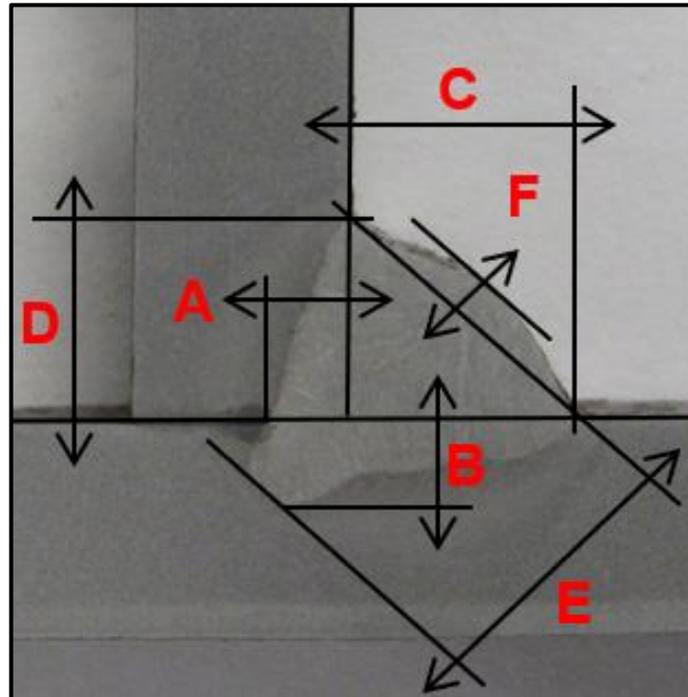
Figura 20 - Exemplo amostra atacada por nital 5%



Fonte: o Autor (2022)

Por último, foram realizadas as medições da geometria do cordão de solda e os resultados foram obtidos a partir de foto com ampliação óptica de 7x. A Figura 21 mostra a esquematização das cotas para medições do perfil de solda.

Figura 21 - Esquemática das cotas para medição da geometria da solda



Fonte: o Autor (2022)

- A → profundidade de fusão chapa 1.
- B → profundidade de fusão chapa 2.
- C → perna horizontal.
- D → perna vertical.
- E → garganta efetiva.
- F → concavidade.

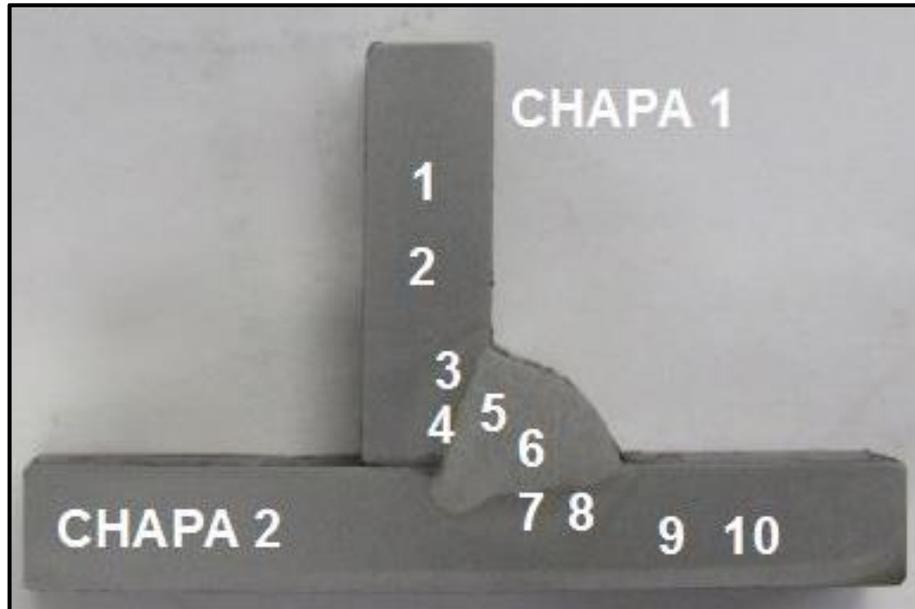
### 3.2.5 Realização do perfil de dureza Vickers

A verificação da dureza no perfil de solda, na ZTA e no metal base se fez necessário a fim de relacionar o desempenho de cada processo em cada metal base, correlacionando com o carbono equivalente e a energia de soldagem. A dureza auxiliou a determinar a qualidade das propriedades mecânicas da junta soldada e os impactos do ponto de vista mecânico no metal base, através da avaliação na ZTA.

O ensaio foi realizado com as mesmas amostras da macrografia em microdurometro da

marca Shimadzu modelo HMV-2 e seguindo a norma ABNT NBR NM-ISO 6507-1. Foram executadas 10 medições com 0,5 kgf de carga em cada ponto e o uso de lente de 500 vezes de aumento para auxílio de visualização em computador. A Figura 22 ilustra o sentido de deslocamento e as regiões de ensaio, partindo da chapa superior, passando pela ZTA da chapa superior, solda, ZTA da chapa inferior e chapa inferior, sendo 2 medições por região.

Figura 22 - Sentido de deslocamento e medições do ensaio de dureza



Fonte: o Autor (2022)

### 3.2.6 Leitura da forma de onda

A leitura da forma de onda teve o propósito de, principalmente, em comparar com as curvas teóricas estudadas no capítulo 2, além de correlacionar com os outros resultados, como penetração e energia de soldagem.

A leitura se fez via *software Weld Data Management Panasonic*. A ferramenta coletou na saída da fonte de solda os dados de tensão, corrente e velocidade de alimentação de arame. O recurso foi configurado para uma taxa de aquisição de dados de 20 kHz (uma medição a cada 50  $\mu$ s) e gravou as informações por 0,5 segundos na memória interna do controlador, totalizando uma base 10000 dados aproximadamente.

A soldagem ocorreu em corpos de prova secundários, ou seja, a coleta não foi realizada durante as soldagem das amostras 1 a 8, visto que os resultados não influenciariam em outra análise. Os parâmetros setados seguiram os mesmos dos corpos de prova 1 (280 A; 26,7 V; 450 mm/min; HD-Pulse) e da amostra 2 (280 A; 21,5 V; 380 mm/min; S-AWP).

Para os demais parâmetros, não foi realizado a leitura, visto que o comportamento da onda elétrica é inalterado no que tange aos processos, variando-se apenas os valores de corrente e tensão.

Os dados foram extraídos para memória externa e tratados via planilha eletrônica para representação real das curvas. Da base de dados completa, extraiu-se de 200 a 300 valores para representação dos gráficos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a soldagem robotizada e relaciona os testes entre si, em processo, materiais, energia e carbono equivalente para verificar o desempenho produtivo e metalúrgico de cada técnica estudada.

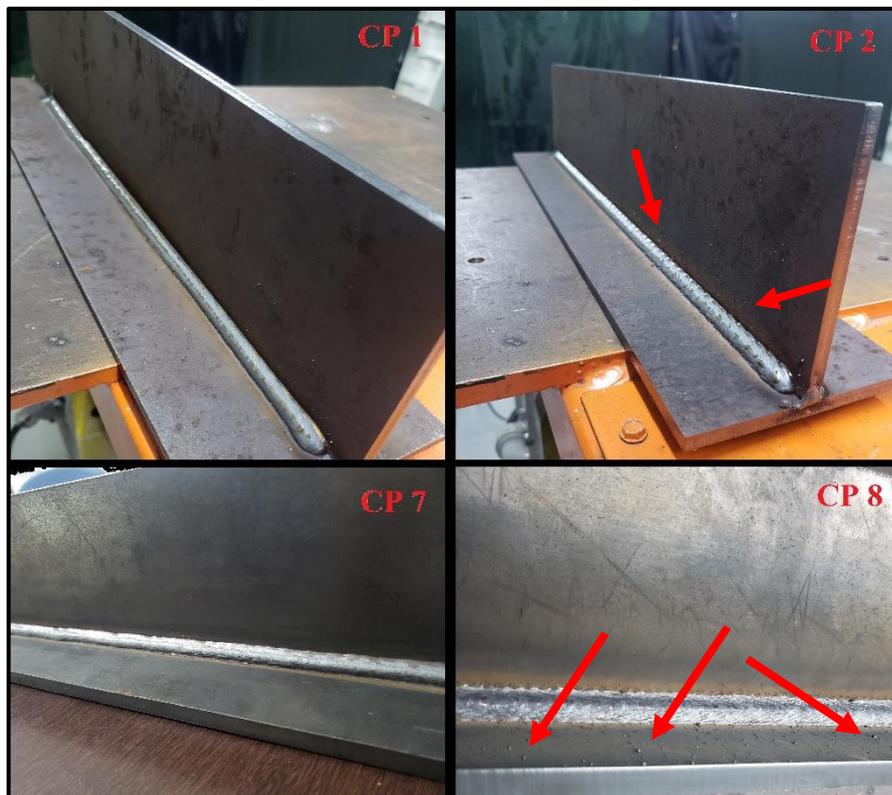
Os resultados serão apresentados conforme a sequência temporal dos testes realizados, iniciando com a soldagem robotizada até a medição da dureza e macrografia do perfil de solda.

A partir deste momento, as chapas com espessura de 6,35 mm são chamadas de chapas finas, enquanto as de 9,53 mm de chapas grossas. A comparação deve ser sempre entre as amostras 1 *versus* 2, 3 *versus* 4 e assim por diante.

### 4.1 RESULTADO DA SOLDAGEM

O recurso S-AWP embora seja um curto-circuito controlado teve maior incidência de respingos em relação ao HD-Pulse. Isso se deve ao fato de que, para atingir a geometria de perna necessária, se utilizou a técnica de costura, causando alterações na distância do arco elétrico. A Figura 23, através dos CPs 2 e 8, evidencia esse comportamento.

Figura 23 - Resultados da soldagem



Fonte: o Autor (2022)

Outra forma de comprovar a incidência de respingos é através do rendimento metálico que será abordado no item 4.5.

Os dados coletados durante a soldagem robotizada estão apresentados conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Dados coletados na soldagem

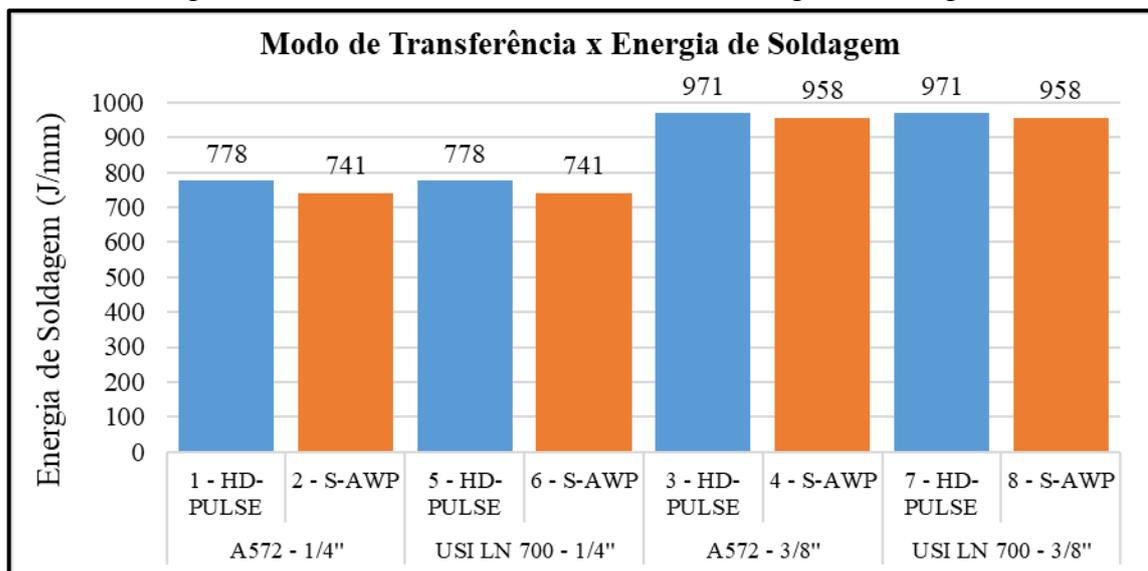
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
<b>Velocidade de Alimentação de Arame (m/min)</b>	10,25	8,85	13,67	10,60	10,25	8,85	13,67	10,60
<b>Quantidade Arame Utilizado (m)</b>	9,46	12,33	14,42	16,22	11,21	13,52	15,33	16,58
<b>Tempo de Arco Aberto (s)</b>	56,3	74,4	66,6	84,5	66,6	78,1	66,6	84,2

Fonte: o Autor (2022)

#### 4.2 MEDIÇÃO DA ENERGIA DE SOLDAGEM

Baseado nas informações da Tabela 6 e aplicando a Equação 1 com eficiência térmica de 0,78, foram obtidos os valores nominais de energia de soldagem (Figura 24). Comparando o CP 1 com o 2, e assim sucessivamente, o S-AWP teve menor energia de soldagem em relação ao HD-Pulse. Enquanto nas chapas finas (amostras 1, 2, 5 e 6) a diferença é de 4,6% de energia, o percentual cai para 1,4% nas chapas grossas.

Figura 24 - Gráfico modo de transferência x energia de soldagem



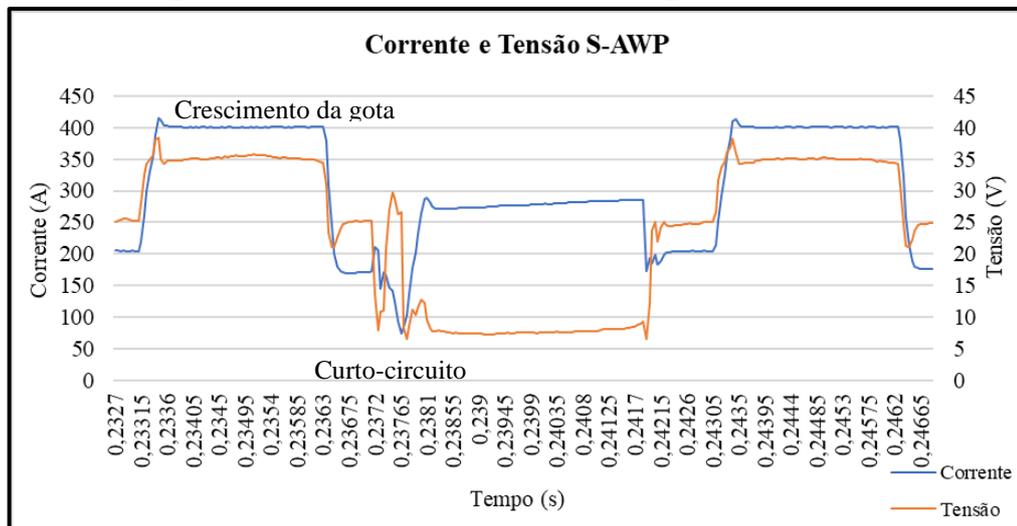
Fonte: o Autor (2022)

Esse fator pode ser explicado através dos dados da Tabela 6, no qual aumenta-se 50 A a corrente média nas chapas grossas em relação as finas e a tensão média tem leve alteração (0,2 V). Outro ponto é a redução da velocidade de deslocamento: enquanto nas chapas finas, o S-AWP reduz em 15,5% a velocidade em relação ao HD-Pulse, nas chapas grossas essa redução de velocidade foi de 22%.

#### 4.3 MEDIÇÃO DA FORMA DE ONDA

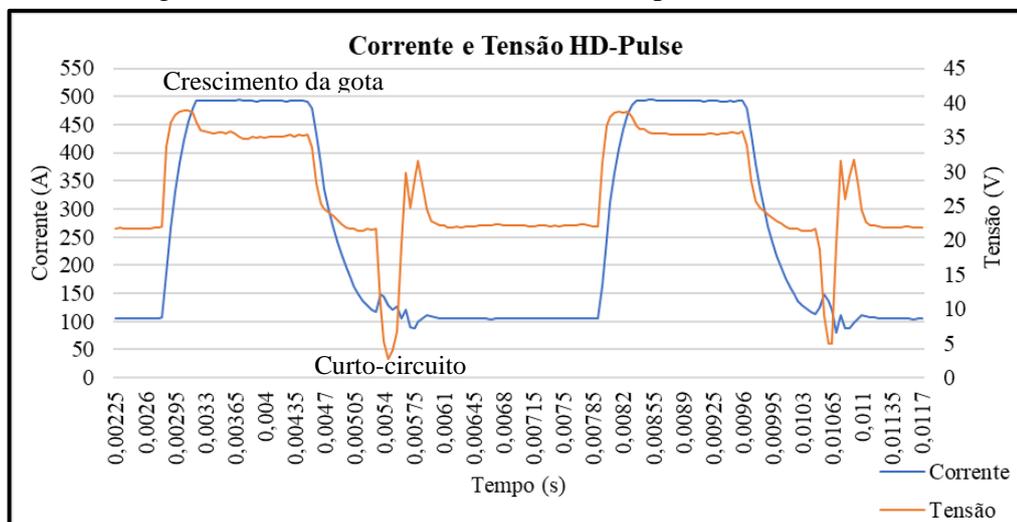
As Figuras 25 e 26 mostram as formas de onda dos processos estudados, sendo S-AWP e HD-Pulse respectivamente.

Figura 25 - Gráfico corrente e tensão do processo S-AWP



Fonte: o Autor (2022)

Figura 26 - Gráfico corrente e tensão do processo HD-Pulse



Fonte: o Autor (2022)

O gráfico do S-AWP segue o mesmo comportamento do diagrama apresentado no Capítulo 2 (Figura 10). Na figura acima, os picos são mais acentuados do que na Figura 10, a qual mostra uma curva mais suave. Essa diferença (da Figura 10) pode estar relacionada a forma de aquisição de dados (recurso, taxa de aquisição, parâmetros) e aos tratamentos que podem ter recebido.

Apesar da distinção citada, o gráfico apresenta comportamento elétrico equivalente, com a formação da gota no primeiro pulso e principalmente com o controle do curto-circuito na baixa tensão e a queda da mesma junto com a queda de corrente, conforme visto na fundamentação teórica. A queda de tensão não foi determinante para que o processo atingisse na sua integralidade ao que foi proposto, principalmente no que tange a incidência de respingos. Esse tópico será abordado no decorrer deste capítulo.

A curva do HD-Pulse também segue o comportamento estudado no Capítulo 2 (Figura 11) e a formação da gota no primeiro pulso. O modo de transferência cumpriu de forma satisfatória de acordo com a referência bibliográfica, principalmente no que tange as penetrações, produtividade e a geometria do filete de solda. Os resultados são encontrados ao longo deste capítulo.

Uma diferença entre os processos que se pode destacar é a frequência entre eles. Enquanto o ciclo S-AWP teve uma frequência de 100 Hz, o HD-Pulse apresentou 196 Hz, ou seja, a quantidade de gotas transferidas pelo processo HD-Pulse é quase o dobro do seu oponente.

#### 4.4 MEDIÇÃO DA TAXA DE DEPOSIÇÃO

A Tabela 9 apresenta os pesos dos corpos de prova antes e após a soldagem.

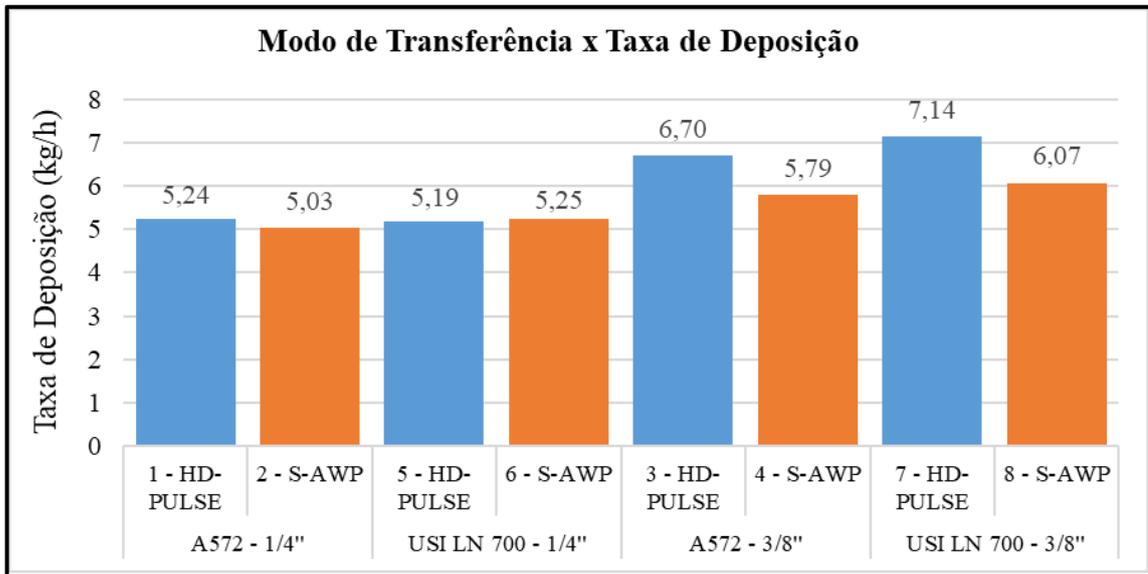
Tabela 9 - Pesos dos corpos de prova

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
<b>Peso Inicial (kg)</b>	5,016	5,016	7,900	7,898	5,098	5,124	7,632	7,936
<b>Peso Final (kg)</b>	5,098	5,120	8,024	8,034	5,194	5,238	7,764	8,078

Fonte: o Autor (2022)

Com os dados apresentados acima e o tempo de arco aberto da Tabela 8, utiliza-se a Equação 3 para cálculo da TD. Os resultados são ilustrados na Figura 27.

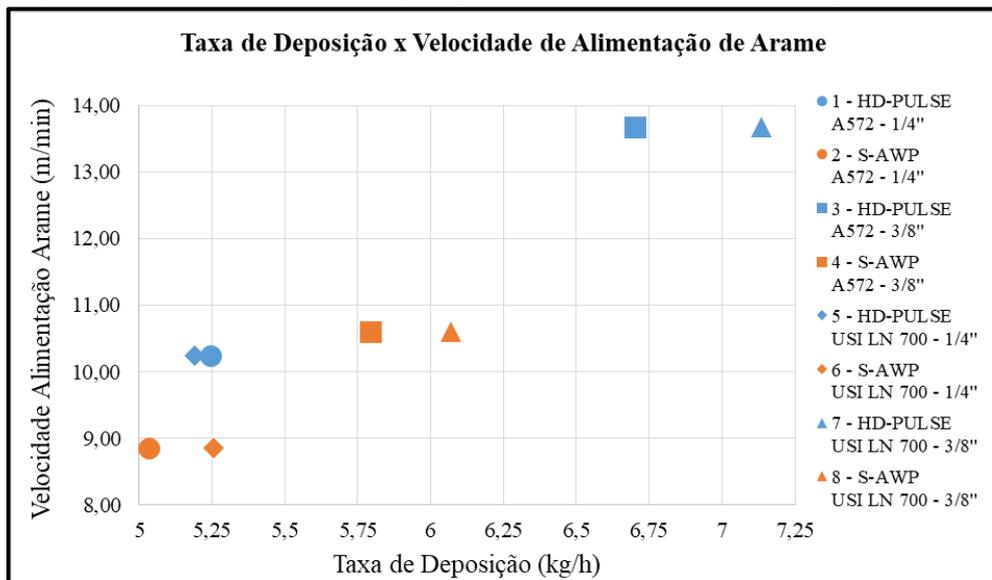
Figura 27 - Gráfico modo de transferência x taxa de deposição



Fonte: o Autor (2022)

Com exceção das amostras 5 e 6, o HD-Pulse se mostra mais produtivo, podendo atingir uma diferença média de 16,6% na TD (amostras 3, 4, 7 e 8). A diferença é menor na chapa fina, aproximadamente 4% (amostras 1 e 2). Isso pode ser explicado através dos dados da Tabela 8, onde a velocidade de alimentação de arame para o processo pulsado é maior em todos os casos.

Figura 28 - Gráfico taxa de deposição x velocidade de alimentação de arame



Fonte: o Autor (2022)

Ao observar a Tabela 6 (dado de corrente) e Tabela 8 (taxa de alimentação de arame) percebem-se duas velocidades de alimentação diferentes para a mesma corrente (exemplo as amostras 1 e 2 com 280 A de corrente e alimentação de arame em 10,25 e 8,85 m/min

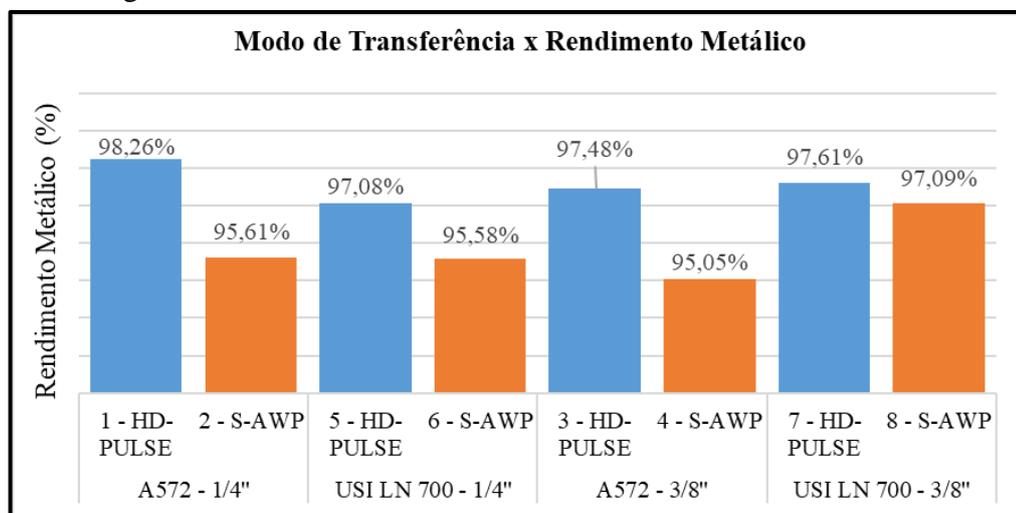
respectivamente). Isso deve-se ao fato que, cada curva sinérgica da fonte tem suas características e o resultado é maior quantidade de arame na poça de fusão por minuto. A Figura 28 ilustra a correlação entre a taxa de alimentação de arame e a TD, no qual evidência a linearidade entre as duas variáveis.

#### 4.5 MEDIÇÃO DO RENDIMENTO METÁLICO

Com base na quantidade de arame utilizado da Tabela 8 e aplicando na Equação 5, teve-se os resultados referente ao rendimento metálico (Figura 29). O RM do processo HD-Pulse foi superior em todas as condições, tendo um valor médio de 97,6% contra 95,8% do S-AWP.

A principal causa encontrada está relacionada ao movimento de costura realizado pela tocha. Os movimentos de oscilação alteram os parâmetros elétricos no arco da solda, devido a mudança de distância entre bico de contato e peça. Essa mudança de parâmetros é suficiente para não fundir corretamente o arame, transformando-o em respingo.

Figura 29 - Gráfico modo de transferência x rendimento metálico

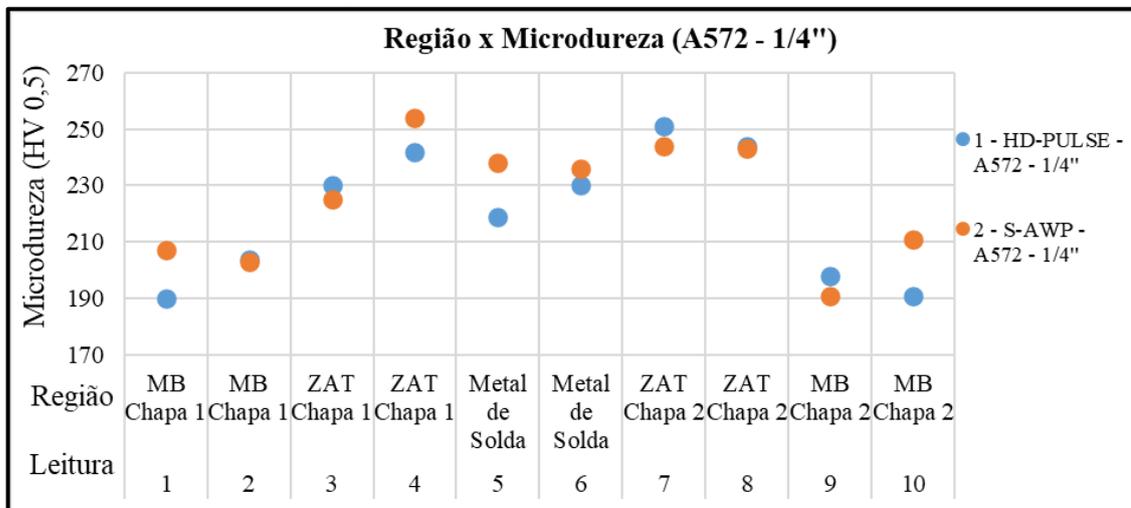


Fonte: o Autor (2022)

#### 4.6 MEDIÇÃO DO PERFIL DE DUREZA VICKERS

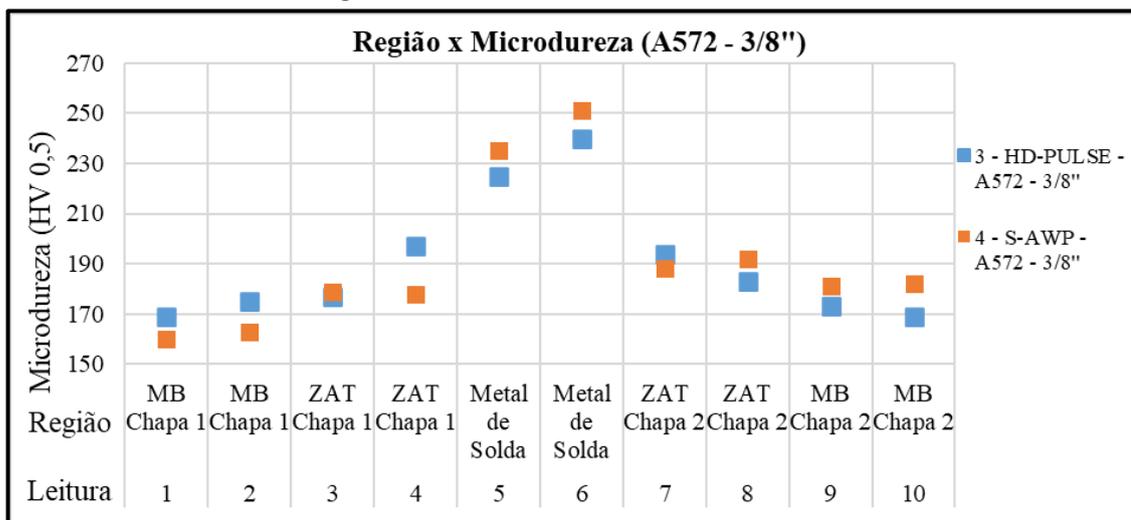
As Figuras 30 a 33 mostram os resultados do perfil de dureza para os materiais A572 e USI LN 700, conforme suas espessuras.

Figura 30 - Perfil de dureza A572 – 1/4”



Fonte: o Autor (2022)

Figura 31 - Perfil de dureza A572 – 3/8”



Fonte: o Autor (2022)

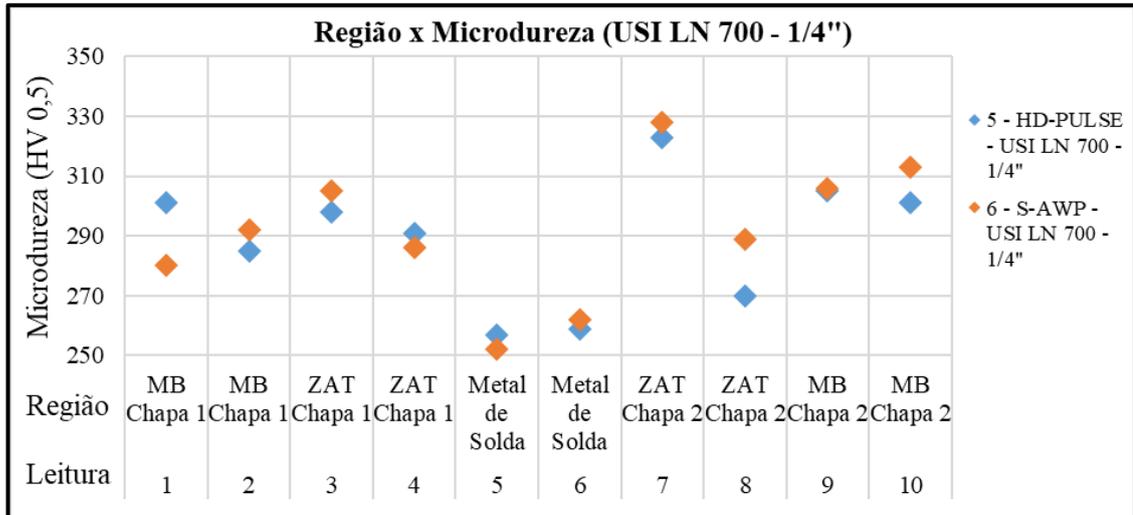
Para o A572 com 6,35 mm de espessura, o S-AWP apresentou maior dureza no metal de solda que o HD-Pulse, mesmo com aporte térmico menor. Já na ZTA próximo ao cordão de solda (regiões 4 e 7) cada chapa teve um comportamento diferente para cada processo. Na região termicamente afetada próximo ao metal base (regiões 3 e 8), as diferenças de energia não causaram diferentes características mecânicas.

Para a espessura de 9,53 mm, o S-AWP também apresentou maior dureza no metal de solda, assim como nas regiões 3 e 8. A dureza do HD-Pulse foi superior na região afetada termicamente próxima ao filete de solda.

Para ambas as espessuras, o comportamento geral da dureza mostrou-se idêntico, ou seja, há aumento da dureza no metal de solda em relação ao metal base, e a ZTA é a faixa de

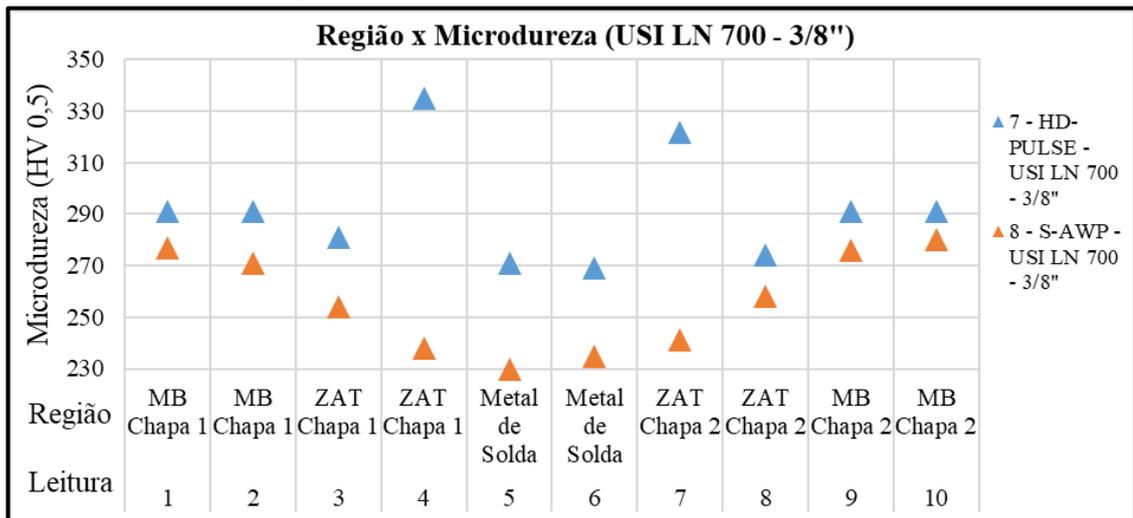
transição entre esses valores. O fato de que o curto-S-AWP tem dureza inferior em 3 das 4 regiões próximas a solda está relacionada aporte térmico colocado na peça por este processo, que foi inferior nas duas espessuras de materiais. Como já visto no Capítulo 2, o aporte térmico inferior gera uma taxa de resfriamento mais rápida e consequentemente formação de grãos menos duros.

Figura 32 - Perfil de dureza USI LN 700 – 1/4”



Fonte: o Autor (2022)

Figura 33 - Perfil de dureza USI LN 700 – 3/8”



Fonte: o Autor (2022)

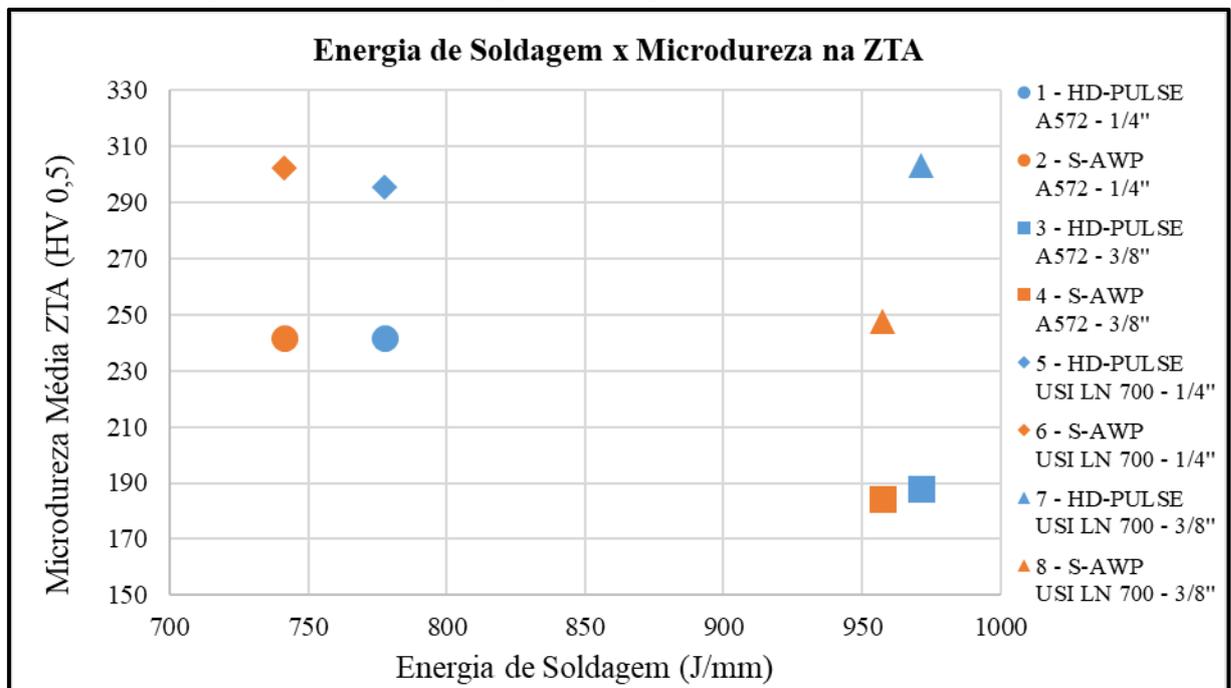
Para o LN 700 com 6,35 mm de espessura, os processos tiveram resultados semelhantes no metal de solda. Na ZTA próximo ao cordão de solda (regiões 4 e 7) cada chapa teve um comportamento diferente para cada processo (assim como no material A572), entretanto, os dois processos mostraram um pico de dureza na região 7, o que caracteriza a formação de

granulação grosseira na microestrutura.

Para a espessura de 9,53 mm, o S-AWP apresentou menor dureza nas ZTAs e no metal de solda. O destaque nesta espessura está novamente para os picos de dureza na zona afetada pelo calor no processo HD-Pulse. Não foi possível estabelecer uma relação clara entre a energia de soldagem e as diferenças de dureza nas ZTA. Entretanto, o aumento de dureza na região da solda deste material já era esperado devido ao alto carbono equivalente (0,61 contra 0,467 do A572).

Correlacionando a energia de soldagem com a dureza média na ZTA (média das leituras 3, 4, 7 e 8), obteve-se o gráfico da Figura 34. Com exceção das amostras 7 e 8, as diferenças de energia não tiveram impacto significativo na dureza da ZTA.

Figura 34 - Gráfico energia de soldagem x média de dureza na ZTA

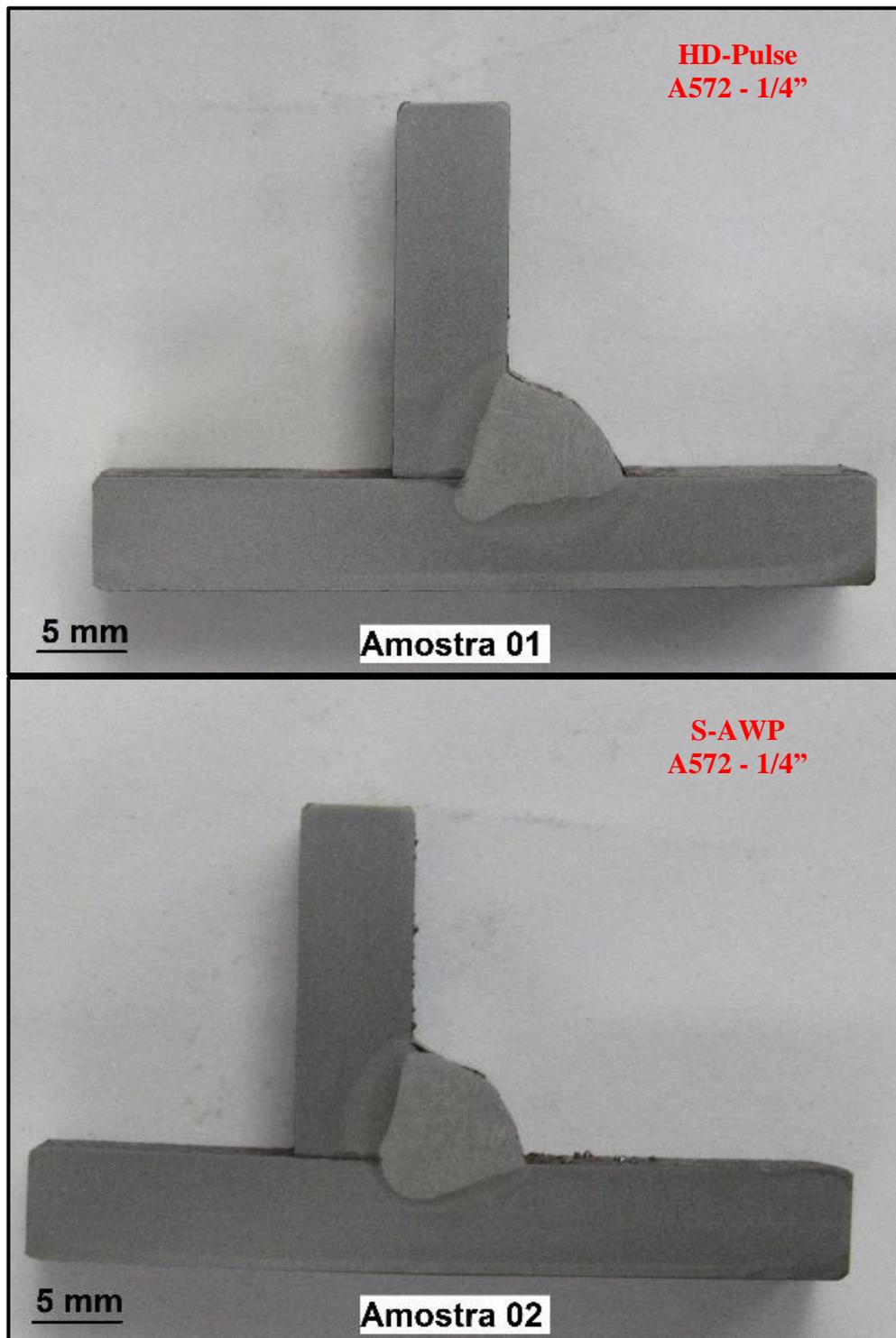


Fonte: o Autor (2022)

#### 4.7 MEDIÇÃO DA MACROGRAFIA

A Figura 35 apresenta os efeitos dos modos de transferência estudados em função da penetração, através de análise macrográfica em 2 dos 8 casos. Os resultados das medições das amostras (fusão, perna, garganta) encontram-se por completo no Apêndice A.

Figura 35 - Resultados da macrografia

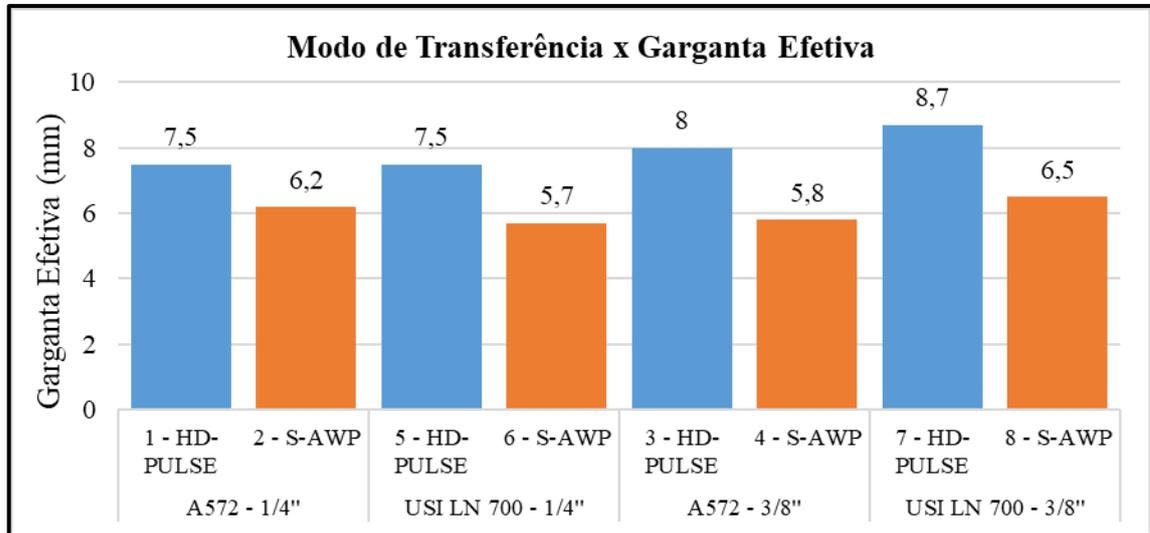


Fonte: o Autor (2022)

Percebe-se em todos os casos que o HD-Pulse do teve uma penetração mais profunda, principalmente na raiz da junta. O S-AWP retratou uma fusão mais uniforme em relação ao pulsado, entretanto, de menor valor no vértice (ver Apêndice A). Este comportamento está associado ao movimento de costura realizado na soldagem S-AWP. Outros dois pontos que se

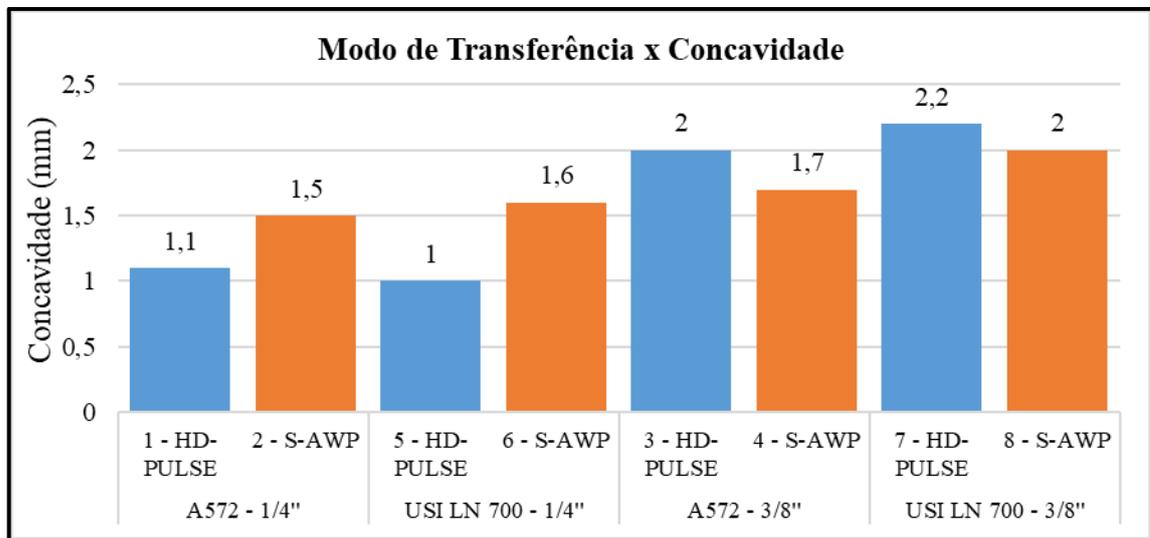
destacam são o princípio de mordeduras e a concavidade menor nas chapas grossas (amostras 04 e 08b). Essas análises podem ser comprovadas através dos gráficos das Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Gráfico modo de transferência x garganta efetiva



Fonte: o Autor (2022)

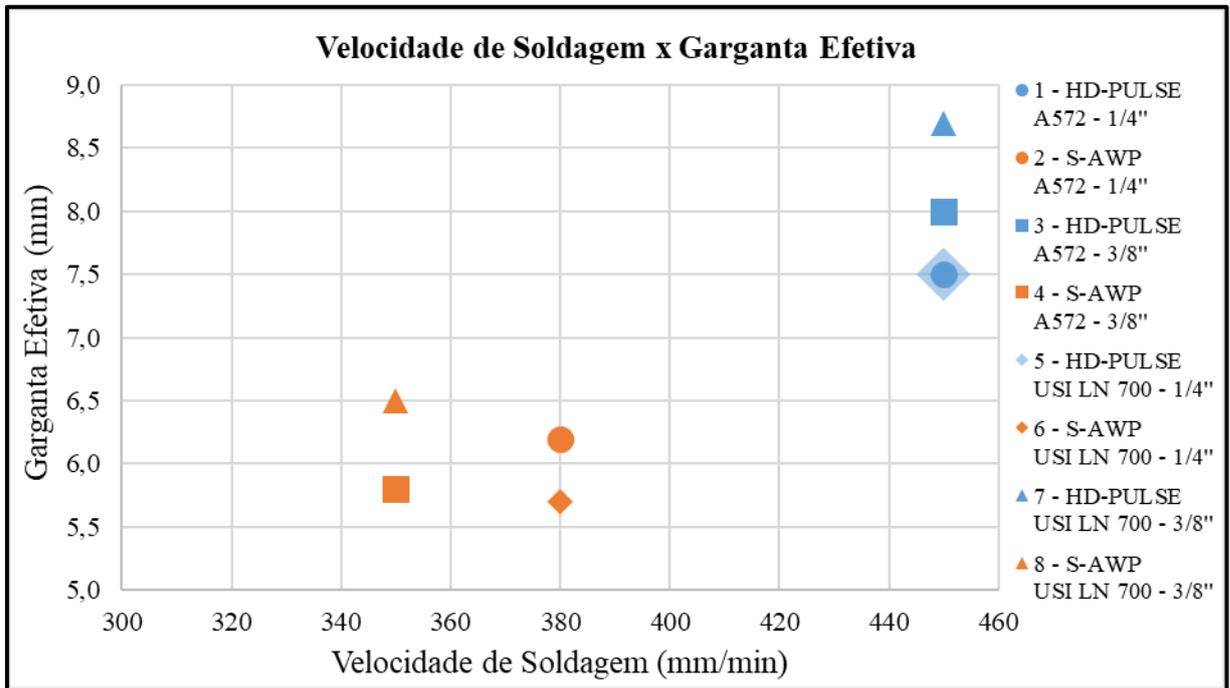
Figura 37 - Gráfico modo de transferência x concavidade



Fonte: o Autor (2022)

Correlacionando a garganta efetiva em função da velocidade de soldagem dos processos (dados da Tabela 6), percebe-se que o HD-Pulse apresentou maiores penetrações, de acordo com a Figura 38. Ou seja, para os mesmos valores de perna, o HD-Pulse, teve na média 31% a mais de profundidade de fusão mesmo com velocidades 23% maiores.

Figura 38 - Gráfico velocidade de soldagem x garganta efetiva



Fonte: o Autor (2022)

## 5 CONCLUSÃO

Baseado nas técnicas aplicadas e nos testes realizados, é possível concluir que o S-AWP deteve menor energia de soldagem do que o HD-Pulse, no entanto, a diferença de aporte térmico não foi suficiente para influenciar, de maneira geral, na dureza das ZTAs. A diferença de dureza encontrada na ZTA do LN 700 com 9,53 mm de espessura, pode ser explicada pelo carbono equivalente do material ser superior a 0,6, originando a formação de estruturas mais duras na ZTA.

O HD-Pulse foi convincente no que tange aos quesitos de produtividade medidos, tendo maior taxa de deposição, maior rendimento metálico, além de maiores velocidades de soldagem. Complementando, ainda foi possível analisar que mesmo com velocidades de deslocamento superiores, na faixa de 23%, o pulsado apresentou fusões 31% maiores, para o mesmo tamanho de perna de solda.

Em termos de penetração, ambos atenderam de forma satisfatória, porém, o HD-Pulse apresentou ser mais enérgico nesse ponto, principalmente devido as penetrações mais profundas na raiz da junta e aspecto visual mais adequado (concauidade menor, sem princípios de mordedura). Isso traz maior segurança mecânica para as juntas soldadas com este processo.

As curvas coletadas na saída da fonte de solda foram semelhantes as apresentadas na fundamentação teórica. O processo HD-Pulse comprovou as questões de produtividade, através da maior taxa de alimentação de arame, e penetração superior através da macrografia. O S-AWP se destacou pelo controle do curto-circuito e a queda de tensão no instante em que é identificado o curto-circuito, entretanto, esses recursos não foram suficientes para reduzir os respingos da solda causados pela oscilação da tocha.

Por fim, o modo de transferência metálica HD-Pulse teve desempenho superior nos parâmetros avaliados na soldagem de aços de alta resistência e baixa liga, podendo chegar a 16% a mais de taxa de deposição, 97% de rendimento metálico e velocidade de soldagem 23% maiores que o S-AWP, e ainda, apresentando penetrações 31% superiores que o seu oposto.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) Avaliar o curto-circuito controlado com outras misturas gasosas, mantendo o HD-Pulse com o gás de proteção utilizado neste trabalho, assim como as demais variáveis.

Exemplos de gases de proteção que podem ser utilizados:

a. 95% Ar + 5% O<sub>2</sub>.

b. 100% CO<sub>2</sub>.

2) Realizar maior quantidade de corpos de prova, entretanto, sem variações de espessura e/ou metal base, podendo ainda incluir:

a. transferência pulsada como mais uma forma de transferência metálica;

b. ensaios mecânicos (dobramento e/ou tração) e micrografia;

## REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. 9 th. Miami: AWS, 2011.

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook**: properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. 10. th. Ohio: The Materials Information Company, 1990. 2521 p.

BARRA, Sergio Rodrigues. **Aspectos Metalúrgicos do Processo MIG com Pulsação Térmica: Efeito da Frequência e do Ciclo de Trabalho**. In: XXVIII CONSOLDA, São Paulo, Nov. 2002.

BELINGA, Eric Martial Mvola. **Applications and Benefits of Adaptive Pulsed GMAW**. 2012. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mechanical Engineering, Faculty Of Technology, Lappeenranta University Of Technology, S.L, 2012.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz; BASTOS FILHO, Teodiano Freire; FELIZARDO, Ivanilza; ROGANA, Wagner Gomes. **SOLDAGEM ROBOTIZADA**. In: ROMANO, Vitor Ferreira. **Robótica Industrial**: aplicação na indústria de manufatura e de processos. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. Cap. 8. p. 157-173.

BRACARENSE, Phd. Alexandre Queiroz. **Gas Metal Arc Welding**. 2013. UFMG - Escola de Engenharia. Disponível em: <https://infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/423-gas-metal-arc-welding>. Acesso em: 19 set. 2021.

CARY, H.B. **Modern Welding Technology**, 3 th., Regents Pretence-Hall, 1994.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros fundidos**. 7 ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 1996.

COSTA, Thonson Ferreira; BENEDETTI FILHO, Edmundo; AREVALO, Hernán Dario Hernández; VILARINHO, Louriel Oliveira. Avaliação de processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único. *Soldagem & Inspeção*, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 356-368, dez. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242012000400010>.

DEVAKUMARAN, K.; RAJASEKARAN, N.; GHOSH, P. K. Process Characteristics of Inverter Type GMAW Power Source Under Static and Dynamic Operating Conditions. *Materials And Manufacturing Processes*, [S.L.], v. 27, n. 12, p. 1450-1456, dez. 2012. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2012.663149>.

ESAB ([S.L.]). **Soldagem MIG/MAG**. 68 p. Disponível em: [https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0\\_apostilasoldagemmig\\_mag\\_low.pdf](https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmig_mag_low.pdf). Acesso em: 15 nov. 2021.

GIMENES JUNIOR, Luiz; RAMALHO, José Pinto. **MIG/MAG**. 2013. Disponível em: <https://infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/349-processo-mig-mag>. Acesso em: 19 set. 2021.

GORNI, Antonio Augusto. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. **Corte e Conformação**. n. 1, p. 26-57, dez. 2008.

HAUPT, W. et al. Effect of wire electrode and shielding gas compositions on the mechanical properties of DOMEX 700 steel welded by the GMAW-P process. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering**, [S.L.], v. 40, n. 4, p. 174-185, 15 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-018-1117-5>.

HILMY, Zakwan; SUPOMO, Heri; ZUBAYDI, Achmad. Comparison Analysis of the Gmaw Pulsed Welding Process on Gmaw Modified Short Circuit in Offshore Piping System. **International Journal Of Applied Engineering Research**, Dept. Of Naval Architecture, Sepuluh Nopember Institute Of Technology, Surabaya, Indonesia, p. 192-201, 2019.

KEELER, Stuart. **Simple Graphics Can Send the Wrong Message**. 2015. Disponível em: <https://www.metalfformingmagazine.com/article/?/materials/high-strength-steel/simple-graphics-can-send-the-wrong-message>. Acesso em: 14 out. 2021.

LIU, Anhua; TANG, Xinhua; LU, Fenggui. Arc profile characteristics of Al alloy in double pulsed GMAW. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 65, n. 1-4, p. 1-7, 29 abr. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4141-0>.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas: processos**. Porto Alegre: Editado Pelo Autor, 1996. 491 p.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **SOLDAGEM: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 363 p.

MODENESI, Paulo Jose. **Introdução à Física do Arco Elétrico**. 44 p. Belo Horizonte: UFMG - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2012.

MODENESI, Paulo Jose. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. [S. L.]. 2011. 27 p. UFMG - Escola de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

MODENESI, Paulo Jose; MARQUES, Paulo Villani. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 1 ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. 2008. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

MVOLA, Belinga; KAH, Paul; LAYUS, Pavel. Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 96, n. 9-12, p. 4243-4265, 22 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-1879-z>.

NORRISH, John. Recent gas metal arc welding (GMAW) process developments: the implications related to international fabrication standards. **Welding In The World**, [S.L.], v. 61, n. 4, p. 755-767, 24 abr. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-017-0463-8>.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

PAL, Kamal; PAL, Surjya K. Effect of Pulse Parameters on Weld Quality in Pulsed Gas Metal Arc Welding: a review. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, [S.L.], v. 20, n. 6, p. 918-931, 11 ago. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-010-9717-y>.

PANASONIC (org.). **TAWERS: HD-Pulse Process**. [20--]. Disponível em: [https://pdf.directindustry.com/pdf/panasonic-robot-welding-system-solutions/tawers-hyper-dip-pulse/29315-499271-\\_2.html](https://pdf.directindustry.com/pdf/panasonic-robot-welding-system-solutions/tawers-hyper-dip-pulse/29315-499271-_2.html). Acesso em: 20 jul. 2022.

PANASONIC BUSINESS (Japão). **Super Active TAWERS: for sales promotion**. [S.L.], Panasonic Corporation, 2017. Color.

POWERMIG AUTOMAÇÃO E SOLDAGEM LTDA (Caxias do Sul - RS) (org.). **Institucional Powermig 2021: A Evolução Em Movimento**. 2021. Elaborado por Powermig. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=mZm20mf32vY>. Acesso em: 26 ago. 2021.

PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P.K.D.V.; KANG, M.J.. Advancements in pulse gas metal arc welding. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 164-165, p. 1113-1119, Maio 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.100>.

QUITES, A.M. **Introdução à soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002

RAMLAB. **CMT AND SAW-P: A COMPARISON: Cold Metal Transfer (CMT) and Super Active Wire Process (SAW-P) explained**. Disponível em: <https://www.ramlab.com/resources/cmt-and-saw-p-a-comparison/>. Acesso em: 30 set. 2021.

SANTOS, Emanuel B.F. dos; PISTOR, Rob; GERLICH, Adrian P. High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P): the metal beam process. **Manufacturing Letters**, [S.L.], v. 11, p. 1-4, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.01.001>.

SCHEIDMANDEL, Nilo Alberto. **A influência dos parâmetros de soldagem GMAW em juntas de aço ARBL S 700 MC**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento melhor desempenho**. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2008.

SILVEIRA, Prof. José Luís L. **Soldagem**. [S. L.]: UFRJ – Centro de Tecnologia, 2016. 134 slides, color.

WAINER, Emilio; BRANDI, Sergio Duarte; **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo:

E. Blücher, 1992

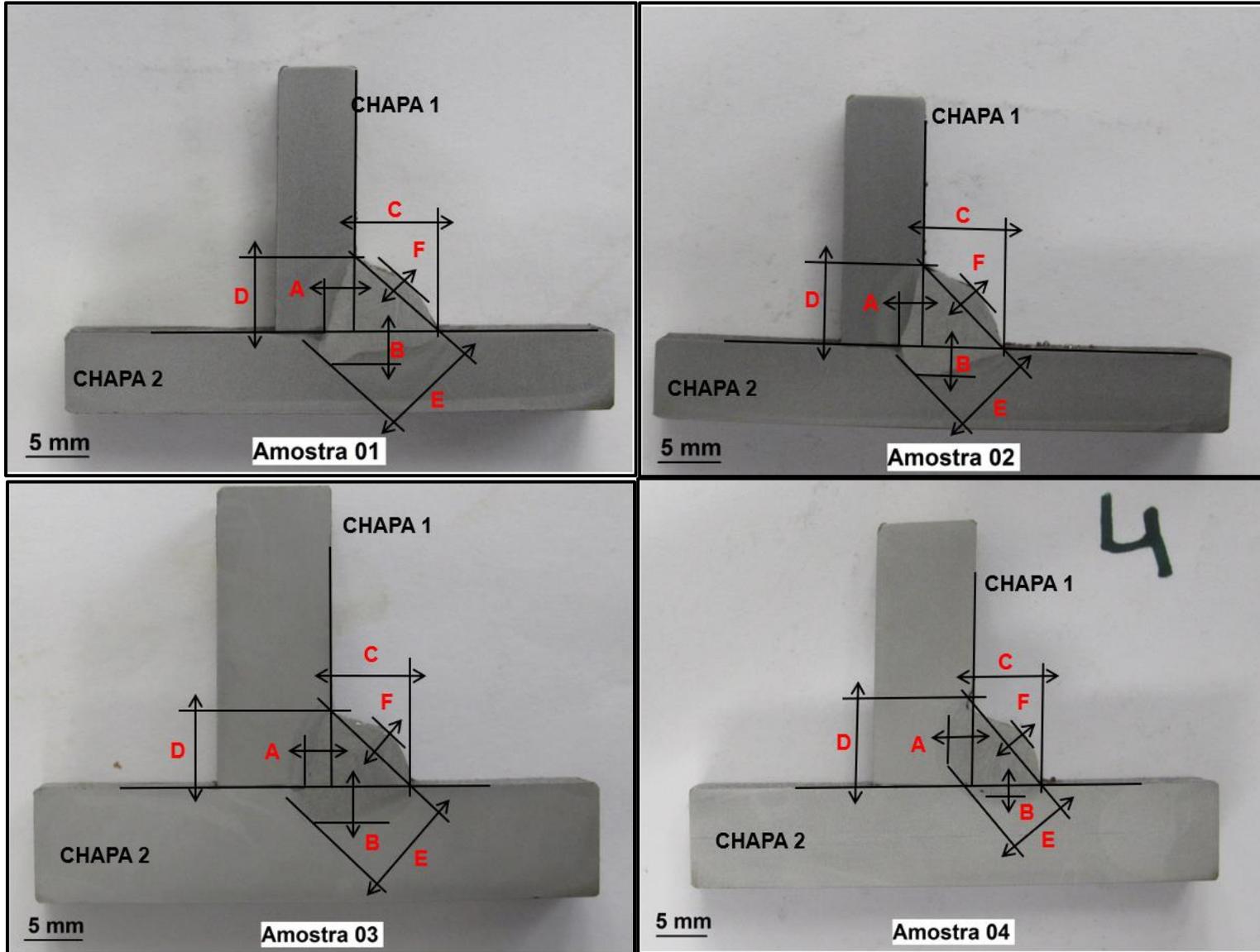
XUE, Jiaxiang; XU, Min; HUANG, Wenjin; ZHANG, Zhanhui; WU, Wei; JIN, Li. Stability and Heat Input Controllability of Two Different Modulations for Double-Pulse MIG Welding. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 127, 1 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app9010127>.

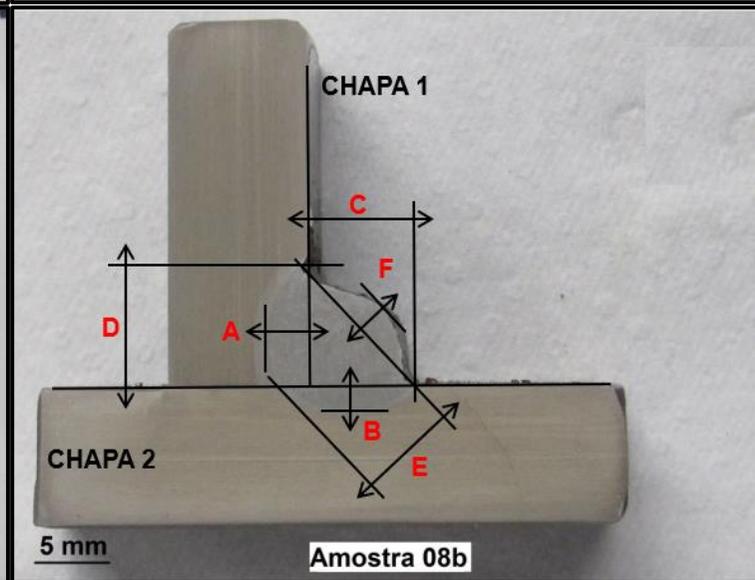
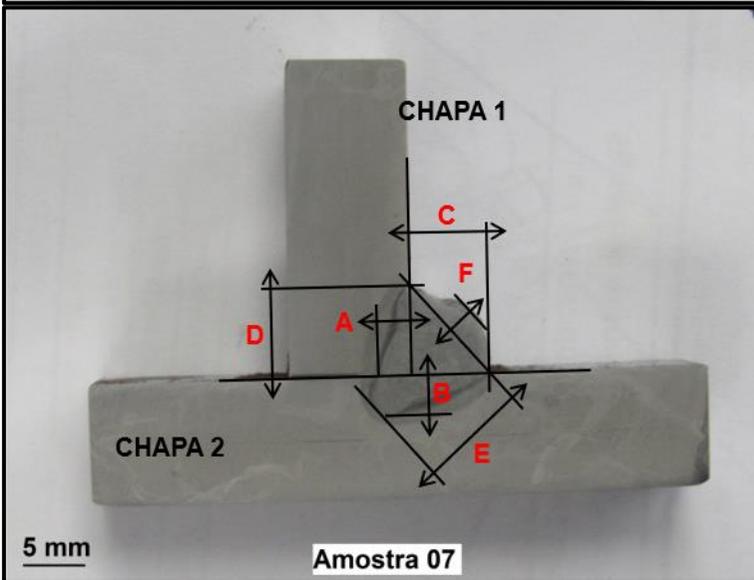
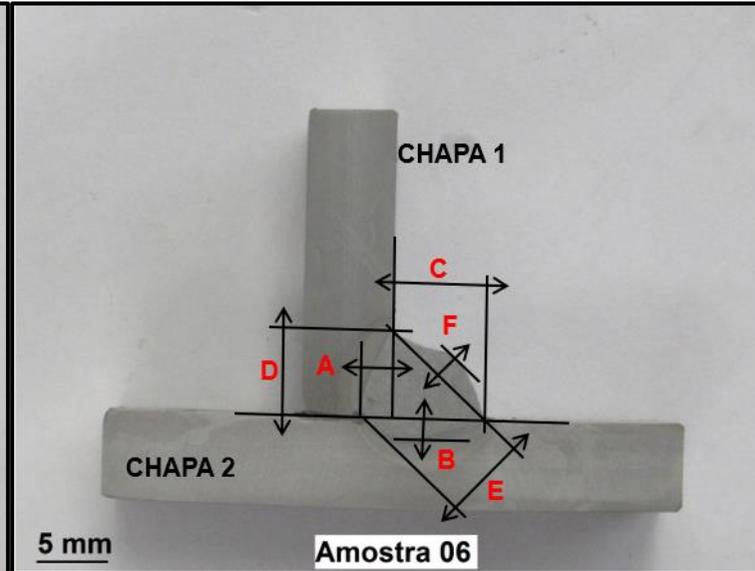
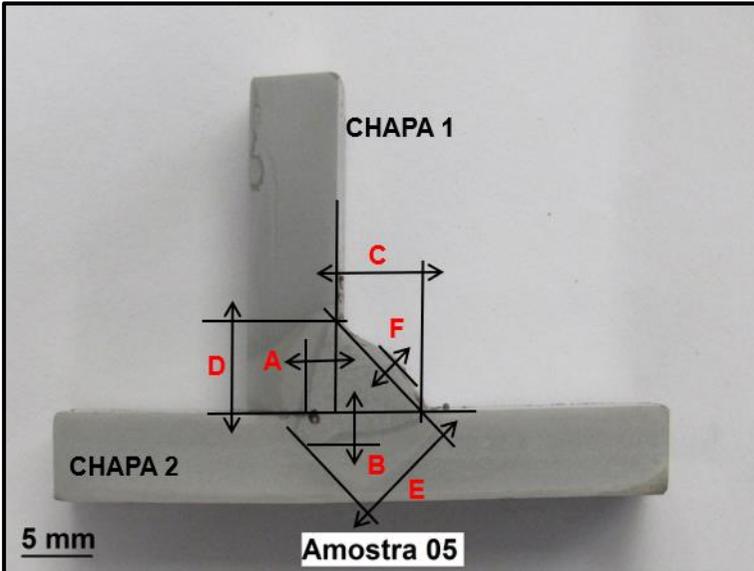
YURIOKA, Nobutaka. Advances in Physical Metallurgy and Processing of Steels. Physical Metallurgy of Steel Weldability. **Isij International**, [S.L.], v. 41, n. 6, p. 566-570, 2001. Iron and Steel Institute of Japan. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.41.566>.

ZIBEROV, Maksym; SCOTTI, Américo. **Mecanismo de formação do cordão em MIG/MAG duplo pulso**. In: POSMEC 2015 – Simpósio Do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica 2015, Uberlândia. Simpósio. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, 2015. p. 1-1.



APÊNDICE A – RESULTADOS DAS MACROGRAFIAS





Referência	Medida (mm)							
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Amostra 05	Amostra 06	Amostra 07	Amostra 08b
A (Profundidade de fusão chapa 1)	2,30	1,20	2,30	2,40	2,10	2,10	2,70	2,90
B (Profundidade de fusão chapa 2)	2,50	2,20	3,00	1,00	2,30	1,40	3,30	1,60
C (Perna horizontal)	6,40	6,30	6,80	6,70	6,00	6,40	6,40	7,00
D (Perna vertical)	5,80	6,30	6,60	8,50	6,30	6,00	7,30	7,90
E (Garganta efetiva)	7,50	6,20	8,00	5,80	7,50	5,70	8,70	6,50
F (Concavidade)	1,10	1,50	2,00	1,70	1,00	1,60	2,20	2,00