



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**Efeito das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos em Soldas Obtidas
ao Arco Elétrico com os Processos por Eletrodo Revestido, MIG/MAG E TIG: Uma
Revisão**

Autor: Reginaldo Alves Félix

Orientador: Prof. DSc. Rodrigo Rangel Porcaro

Ouro Preto
Agosto de 2021

Reginaldo Alves Félix

**Efeito das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos em Soldas Obtidas
ao Arco Elétrico com os Processos por Eletrodo Revestido, MIG/MAG E TIG: Uma
Revisão**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para
a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico

Orientador: Prof. DSc. Rodrigo Rangel Porcaro

**Ouro Preto
Agosto de 2021**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
 Universidade Federal de Ouro Preto
 Escola de Minas
 Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Ao trigésimo dia do mês de agosto de 2021, às 10 horas, por meio da plataforma de videoconferência *Google Meet*, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **Reginaldo Alves Félix**, sendo a comissão examinadora constituída pelo Prof. DSc. Rodrigo Rangel Porcaro (Orientador), pelo Prof. DSc. Luiz Cláudio Cândido e pelo Eng^o Salvatore Giuliano Peixoto Tropia de Abreu. O aluno apresentou a monografia intitulada: “*Efeito das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos em Soldas Obtidas ao Arco Elétrico com os Processos por Eletrodo Revestido, MIG/MAG e TIG: Uma Revisão*”. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 30 de agosto de 2021.

Prof. DSc. Rodrigo Rangel Porcaro
 Orientador – Presidente

Prof. DSc. Luiz Cláudio Cândido
 Membro

Eng. Salvatore Giuliano Peixoto Tropia de Abreu
 Membro

Reginaldo Alves Félix
 Aluno

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, ele está presente no meio de nós.

Ao Prof. DSc. Rodrigo Rangel Porcaro, pela formidável orientação, disponibilidade, compreensão, confiança e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos membros da banca examinadora, por aceitar o convite, pelo feedback construtivo e sugestões.

A toda minha família, minha mãe e meus irmãos pelo apoio e motivação.

A UFOP, Escola de Minas, todos os Professores, Técnicos dos Laboratórios e Técnicos Administrativos pelo atendimento, dedicação e ensinamentos.

Aos colegas de classe pelo companheirismo e aos amigos pela certeza da torcida por esta conquista.

Resumo

A demanda por melhoria de qualidade e produtividade proporcionam investimentos em mecanização, automação, ou soluções que auxiliem a obtenção de melhores resultados na área de soldagem. Este trabalho consiste em fazer uma revisão da literatura dos efeitos das configurações elétricas sobre os parâmetros geométricos obtidos em soldas ao arco elétrico por Eletrodo Revestido, MIG/MAG e TIG. A revisão engloba a intensidade de corrente, polaridade, estabilidade, comprimento do arco, e o gás de proteção em relação às características geométricas do cordão de solda e microestrutura do alumínio, do aço carbono e dos aços inoxidáveis superduplex após a soldagem. No processo SMAW verificou-se que a corrente de soldagem utilizada no experimento do aço superduplex UNS S32760 afeta a morfologia do cordão de solda, entretanto a composição química dos dois eletrodos utilizados como metais de adição influenciou no desbalanceamento das fases presentes na microestrutura do material analisado. No processo de soldagem MIG/MAG, estudos com o aço ao carbono SAE 1020 mostraram que é possível obter cordões de boa aparência superficial na condição de polaridade direta, em uma condição de corrente alta e utilizando um gás de proteção com algum teor oxidante, no caso de 2% O₂ de acordo com o experimento mencionado. Para o processo TIG com corrente alternada, um aumento na penetração e na área fundida do alumínio 1200 foi verificado à medida que foram utilizados maiores tempos de polaridade positiva. E experimento do processo de soldagem TIG com aço superduplex UNS S32760 utilizando gás de proteção uma mistura de gases argônio com nitrogênio a porcentagem de austenita presente na zona fundida da junta soldada aumenta em relação a utilização de somente o argônio puro como gás de proteção.

Palavras-chave: corrente, polaridade, SMAW, MIG/MAG, TIG, parâmetros geométricos.

Abstract

The demand for quality and productivity improvement provides investments in mechanization, automation, or solutions that help to obtain better results in the welding area. This work consists in reviewing the literature on the effects of electrical configurations on the geometric parameters obtained in electric arc welds by coated electrode, MIG/MAG and TIG. The review encompasses current intensity, polarity, stability, arc length, and shielding gas in relation to the weld bead geometric characteristics and microstructure of aluminum, carbon steel, and superduplex stainless steels after welding. In the SMAW process it was found that the welding current used in the UNS S32760 superduplex steel experiment affects the morphology of the weld bead, however the chemical composition of the two electrodes used as filler metals influenced the unbalance of the phases present in the microstructure of the analyzed material. In the MIG/MAG welding process, studies with SAE 1020 carbon steel showed that it is possible to obtain beads with a good surface appearance in the direct polarity condition, in a high current condition and using a shielding gas with some oxidizing content, in the 2% O₂ case according to the mentioned experiment. For the TIG process with alternating current, an increase in penetration and in the molten area of aluminum 1200 was verified as longer times of positive polarity were used. And experiment of the TIG welding process with superduplex steel UNS S32760 using shielding gas a mixture of argon with nitrogen, the percentage of austenite present in the welded joint area increases compared to using only pure argon as shielding gas.

Keywords: current, polarity, SMAW, MIG/MAG, TIG, geometric parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 a) - Região do arco na soldagem com eletrodo revestido.....	14
Figura 3.1 b) - Equipamento e circuito do processo	14
Figura 3.2 a) - Soldagem MIG/MAG (esquemático): região do arco elétrico.....	15
Figura 3.2 b) - Soldagem MIG/MAG (esquemático): equipamento básico	15
Figura 3.3 a) - Soldagem TIG (esquemático): região do arco elétrico	16
Figura 3.3 b) - Soldagem TIG (esquemático): equipamento básico TIG.....	16
Figura 3.4 - Variações de corrente e tensão na soldagem TIG com corrente alternada. 18	Figura
3.5 - Conexões e efeitos da corrente contínua	20
Figura 3.6 - Influência da polaridade e do tipo de corrente no processo SMAW.	21
Figura 3.7 - Efeito da corrente, comprimento de arco e velocidade de deslocamento na junta na soldagem pelo processo SMAW.....	21
Figura 3.9 - Macrografia dos cordões de solda, do aço UNS S32760; ataque Behara.10x.	24
Figura 3.10 - Micrografia da região de transição do metal base, Aço UNS S32760, para a zona fundida; ataque Behara. 200x. ZF: Zona Fundida; MB: Metal Base.....	25
Figura 3.11- Comportamento do arco elétrico em polaridade inversa (A) e direta (B) na soldagem GMAW.	27
Figura 3.12 - Gota assimetricamente repelida e ponto catódico na soldagem pelo processo MIG/MAG em CC-.....	28
Figura 3.13 - Aparência superficial dos cordões de solda para as condições (a), (b) e (c) do aço carbono SAE 1020.....	31
Figura 3.14 - Macrografias referentes aos ensaios (a), (b) e (c) da soldagem MIG/MAG do aço carbono SAE 1020.....	32
Figura 3.15 - Fotografias do arco voltaico em CC+ e em CC- dos ensaios da soldagem MIG/MAG do aço carbono SAE 1020.	33
Figura 3.16 - Gráfico de tensão / corrente para fonte pulsada no processo GTAW	36
Figura 3.17 - Características de soldagem GTAW relacionadas com o tipo e polaridade da corrente.....	37
Figura 3.18 - Efeito da CC-, CA e CC+ no processo de soldagem GTAW.....	39
Figura 3.19 - Formato de onda retangular para o processo TIG CA (regulada em 50% eletrodo positivo e 50% eletrodo negativo).	39

Figura 3.20 - A relação entre %EP e a profundidade de penetração (mm) do alumínio 1200 na soldagem TIG com CA	40
Figura 3.21 - Seção transversal dos cordões cortados a 150 mm de distância do início da solda. Vs: 30 cm/min. DEP: 3 mm. Eletrodo 3,2 mm diâmetro com afiação em 90°	42
Figura 3.22 a) - Quantidade de metal fundido para os diferentes gases.	43
Figura 3.23 b) - Tensão e corrente do arco para os diferentes gases.	43
Figura 3.24 - Aspectos micrográficos das juntas soldadas das amostras dos grupos 1 (argônio puro e 25A) e 2 (argônio puro e 40A) da soldagem TIG na ZF do aço UNS S32760.....	45
Figura 3.24 - Aspectos micrográficos das juntas soldadas das amostras dos grupos 3 (argônio + 2,5% de N ₂ e 25A) e 4 (argônio + 2,5% de N ₂ e 40A) da soldagem TIG na ZF do aço UNS S32760.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Parâmetros para avaliar os efeitos da corrente e velocidade de soldagem de aços inoxidáveis superduplex, UNS S32760, pelo processo SMAW.....	23
Tabela 3.2- Parâmetros para os ensaios realizados em diferentes condições de polaridade e velocidade do processo de soldagem MIG/MAG	30
Tabela 3.3- Grupos de amostras com os parâmetros do gás de proteção e da corrente de soldagem TIG do aço UNS S32760.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

%EP: Percentual do eletrodo positivo

ANOVA: *Analysis Of Variance*

Ar: Gás Argônio

CA: Corrente Alternada

CC: Corrente Contínua

CC-: Polaridade direta

CC+: Polaridade inversa ou reversa

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Dióxido de carbono

ESAB: *Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget*

GMAW: *Gás Metal Arc Welding*

GTAW: *Gas Tungsten Arc Welding*

He: Gás Hélio

H₂: Gás Hidrogênio

Humping: defeitos do cordão de solda

LAPROSOLDA: Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem

MAG: *Metal Active Gas*

MB: Metal Base

MIG: *Metal Inert Gas*

N₂: Gás Nitrogênio

O₂: Gás Oxigênio

PV: Polaridade Variável

SAE: *Society of Automotive Engineers*

SAW: *Submerged Arc Welding*

SMAW: *Shielded Metal Arc Welding*

t (-): Tempo de polaridade negativa (ms)

t (+): Tempo de polaridade positiva (ms)

TIG: *Tungsten Inert Gas*

UC-: Tensão de reignição dos arcos nos semi-ciclos negativo

UC+: Tensão de reignição dos arcos nos semi-ciclos positivo

ZF: Zona Fundida

ZTA: Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivos Específicos.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Processo de Soldagem Por Eletrodo Revestido ou SMAW	14
3.2 Processo de Soldagem MIG/MAG ou GMAW	15
3.3 Processo de Soldagem TIG ou GTAW	16
3.4 O Efeito do Arco Elétrico em Corrente Contínua.....	16
3.5 O Efeito do Arco Elétrico em Corrente Alternada	18
3.6 Efeitos das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos no Processo de Soldagem SMAW	19
<i>3.6.1 O Efeito da Polaridade e da Corrente de Soldagem no processo SMAW.....</i>	<i>19</i>
<i>3.6.2 Parâmetros Geométricos no Processo de Soldagem SMAW.....</i>	<i>21</i>
<i>3.6.3 Aspectos e Geometria dos Cordões de Solda no Processo SMAW</i>	<i>22</i>
<i>3.6.4 A Influência da Corrente e do Metal de Adição na Soldagem SMAW em Aços Inoxidáveis Superduplex.....</i>	<i>23</i>
3.7 Efeitos das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos no Processo de Soldagem MIG/MAG	25
<i>3.7.1 Processo de Soldagem MIG/MAG com Polaridade Variável.....</i>	<i>26</i>
<i>3.7.2 A Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG.....</i>	<i>27</i>
<i>3.7.3 A Influência da Polaridade nas Características dos Cordões de Solda e no Comportamento do Arco na Soldagem MIG/MAG de Aços ao Carbono</i>	<i>29</i>
<i>3.7.4 A Influência da Polaridade sobre a Geometria do Cordão de Solda</i>	<i>31</i>
<i>3.7.5 A Influência da Polaridade sobre o Comportamento do Arco Elétrico</i>	<i>32</i>
3.8 Efeitos das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos no Processo de Soldagem TIG.....	33
<i>3.8.1 O Efeito da Corrente Contínua no Processo GTAW.....</i>	<i>35</i>
<i>3.8.2 O Efeito da Corrente Contínua Pulsada no Processo GTAW</i>	<i>36</i>
<i>3.8.3 O Efeito da Corrente Alternada no Processo GTAW.....</i>	<i>36</i>
<i>3.8.4 O Efeito da Polaridade sobre as Dimensões do Cordão de Solda no Processo TIG CA.....</i>	<i>37</i>
<i>3.8.5 A Influência do Tempo de Atuação da Polaridade Positiva na Soldagem TIG CA do Alumínio.....</i>	<i>38</i>
<i>3.8.6 A Influência da Variação da Corrente e da Composição do Gás de Proteção no Processo de Soldagem TIG.....</i>	<i>40</i>
4. CONCLUSÕES.....	47
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem apresentam um aumento na sua utilização desde os primeiros modos de união de materiais desenvolvidos no começo do século passado. Estes processos atingiram um nível de desenvolvimento que os tornaram viáveis para uso industrial (TEIXEIRA, 2011; BELMONTE JR *et al.*, 2019).

Na indústria metal-mecânica é constante a procura por melhoria de qualidade, produtividade, competitividade, além de redução de custos. Deste modo, impulsionam investimentos em mecanização, automação, ou soluções para obter melhores desempenhos nos processos de soldagem.

O comportamento da geometria do cordão de solda é um importante fator na engenharia de projetos e de manufatura em uma indústria de fabricação, pois afeta o projeto e determina os custos de estruturas e dispositivos mecânicos. Além da geometria, as propriedades mecânicas da solda também são de extrema importância, principalmente quando se trata de estruturas pesadas ou de alta responsabilidade em que uma falha de solda pode colocar em risco a vida de seres humanos, além de prejuízos ambientais e econômicos. O conhecimento da microestrutura do cordão de solda permite se conhecer também algumas de suas propriedades, como por exemplo a resistência mecânica, tenacidade, entre outras.

Este trabalho tem como foco principal a pesquisa teórica e avaliação de processos de soldagem, envolvendo a união de três diferentes processos de soldagem por fusão a arco elétrico, neste caso, os processos SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), GMAW (*Gás Metal Arc Welding*) e o GTAW (*Gás Tungsten Arc Welding*). Os processos de soldagem por arco elétrico são fundamentais para a fabricação de componentes metálicos, possuem uma concentração favorável de energia para fusão localizada com custo relativamente baixo da energia elétrica e do equipamento, além do mais, durante a operação visa a integridade física das pessoas (MODENESI, 2012).

A evolução dos componentes eletrônicos impulsionou o desenvolvimento de fontes de soldagem capazes de alterar variáveis de processo, como por exemplo, a corrente de soldagem.

Da mesma forma que são realizadas pesquisas que abordam a questão do efeito da polaridade sobre seus diversos aspectos. Desta maneira, possibilitou o desenvolvimento de soluções na área de soldagem ao arco elétrico (CIRINO, 2009).

Com a motivação de compreender melhor estes processos de soldagem para cada um dos processos ao arco analisados neste trabalho de revisão, SMAW, GMAW e GTAW, são muitas as variáveis do ponto de vista de configuração elétrica e é fundamental conhecer as suas influências sobre a geometria e a microestrutura do cordão de solda.

Devido as condições pandêmicas da COVID-19, provocada pelo vírus SARS-COV-2 e de acordo com as medidas sanitárias de distanciamento estabelecidas pelo protocolo do Ministério da Saúde, ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) e Secretaria Municipal de Saúde, juntamente à UFOP, as atividades acadêmicas e desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso foram meramente teóricas, com encontros por videoconferência.

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem o objetivo realizar uma revisão da literatura, fazer uma análise comparativa dos efeitos das configurações elétricas sobre o comportamento geométricos dos processos de soldagem SMAW, GMAW e GTAW.

2.1 Objetivos Específicos

- i. Realizar uma revisão detalhada dos efeitos das configurações elétricas sobre o comportamento geométrico dos processos de soldagem SMAW, GMAW e GTAW, focando a questão da polaridade, intensidade de corrente, estabilidade do arco e composição do gás de proteção aplicados aos três processos.
- ii. Avaliar a influência sobre a geometria dos cordões de solda e verificar os eventuais efeitos na microestrutura do alumínio, do aço carbono e dos aços inoxidáveis superduplex.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de Soldagem Por Eletrodo Revestido ou SMAW

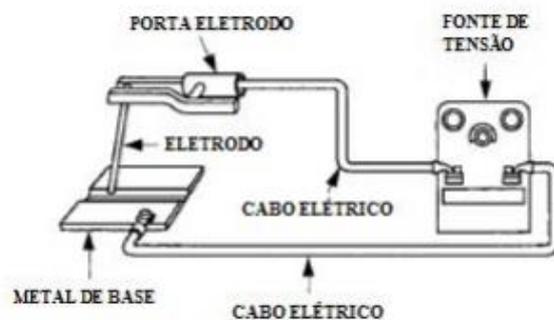
A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido ou SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) é realizada a partir do calor de um arco elétrico mantido entre duas partes metálicas, a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho/metal base. O calor produzido pelo arco elétrico é suficiente para fundir o metal base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases formados devido a composição química do revestimento do eletrodo. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação (ESAB, 2000). O revestimento pode conter elementos que são incorporados à solda, influenciando sua composição química e características metalúrgicas. A Figura 3.1(a,b) ilustra o processo de soldagem por SMAW.

Figura 3.1 a) - Região do arco na soldagem com eletrodo revestido



Fonte: Marques *et al.* (2009)

Figura 3.1 b) - Equipamento e circuito do processo com eletrodo revestido

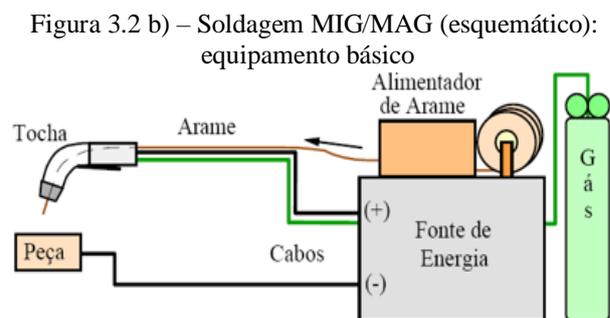
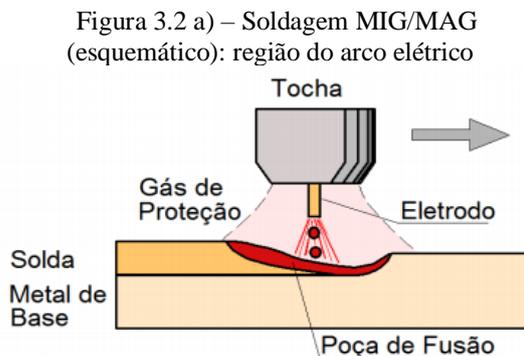


Fonte: ASM (2011)

O equipamento necessário ao processo consiste de porta-eletrodo, cabos e fonte de energia, que pode ser de CC (Corrente Contínua) ou de CA (Corrente Alternada) dependendo do tipo de eletrodo e material a ser soldado (MARQUES *et al.*, 2009).

3.2 Processo de Soldagem MIG/MAG ou GMAW

O processo de soldagem MIG/MAG ou GMAW (*Gás Metal Arc Welding*), caracteriza-se pela geração de um arco elétrico entre um eletrodo metálico consumível nu, e a peça a ser soldada. A proteção do arco elétrico e da região da solda contra a contaminação pela atmosfera ocorre por meio de um gás ou mistura de gases inertes ou ativos introduzidos pela tocha durante o processo. O método de soldagem é denominado MIG quando o gás utilizado é inerte ou uma mistura rica em gases inertes, por exemplo, Ar (Argônio) e He (Hélio), e denominado MAG quando o gás utilizado é ativo ou uma mistura rica em gases ativos, por exemplo, O₂ (oxigênio), CO (monóxido de carbono) ou CO₂ (dióxido de carbono). A Figura 3.2(a,b) apresenta o esquema do processo e do equipamento de soldagem por MIG/MAG.



Fonte: Marques *et al.* (2009)

O modo de operação é considerado semiautomático, onde o metal de adição tem controle automático, mas com o posicionamento da tocha, início e interrupção da soldagem, e o movimento da tocha de soldagem ao longo da junta, sendo executados por controle manual pelo soldador. O processo pode ser mecanizado, com o controle do movimento da tocha de soldagem ao longo da junta pelo equipamento, mas com o posicionamento, acionamento do equipamento e interrupção do processo a cargo do operador de soldagem. A automatização desse processo não apresenta grandes dificuldades, com controle automático de praticamente todas as operações. Os sistemas automáticos de soldagem podem ser projetados para executar uma operação específica de soldagem, basicamente com nenhuma flexibilidade para mudanças nos processos, e em sistemas com atuação robótica, programáveis e alterações no processo (MARQUES *et al.*, 2009).

O equipamento para soldagem é constituído por uma fonte de energia com tensão constante,

com um transformador-retificador, um sistema de alimentação do arame-eletrodo, tocha de soldagem, fonte de gás de proteção, cabos e mangueiras. E para o caso de soldagem mecanizada são obtidos posicionadores e sistema de movimentação da tocha.

3.3 Processo de Soldagem TIG ou GTAW

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) foi desenvolvido para a soldagem de materiais de fácil oxidação como o alumínio e o magnésio, particularmente para a indústria de aviação no início da segunda guerra mundial. Atualmente, este processo é também utilizado na soldagem de materiais especiais como na costura e união de topo de tubos de aços inoxidáveis e em diversas aplicações específicas, nas quais a qualidade e o controle da geometria do cordão de solda são de fundamental importância, como por exemplo, na soldagem de passes de raiz em tubulações de aços em geral e de outros materiais (MARQUES *et al.*, 2009).

A Figura 3.3(a,b) uma representação esquemática do processo e dos equipamentos usados.

Figura 3.3 a) - Soldagem TIG (esquemático): região do arco elétrico

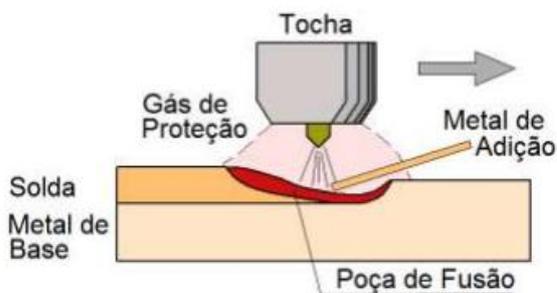
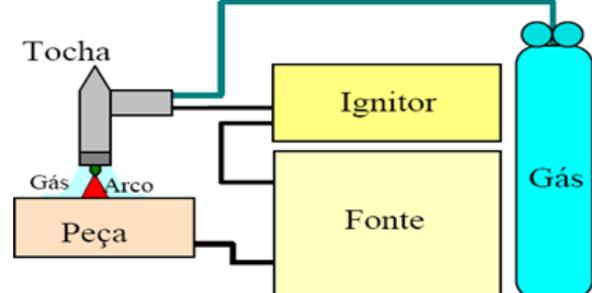


Figura 3.3 b) - Soldagem TIG (esquemático): equipamento básico TIG



Fonte: Marques *et al.* (2009)

É um processo de soldagem por fusão que utiliza como proteção gás inerte, geralmente o argônio, ou uma mistura de gases, como por exemplo, argônio e hélio. O arco elétrico é formado entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e o metal base (MARQUES *et al.*, 2009).

3.4 O Efeito do Arco Elétrico em Corrente Contínua

A fonte de calor fornecida pelo arco elétrico é essencial na soldagem por fusão de metais. Para uma soldagem por fusão é necessária uma grande quantidade de calor concentrado. A soldagem

por fusão tem características que são adequadas para esse processo como concentração adequada de energia, facilidade de controle e custo relativamente baixo do equipamento. Para o desenvolvimento da operação de soldagem a arco elétrico, a estabilidade de um arco elétrico é um fundamental. Um arco elétrico é considerado estável quando o escoamento do calor é uniforme e a deposição do material de adição de solda é contínua (WEGRZYN, 1980).

As variações de tensão e corrente de soldagem, influenciam no tipo de transferência metálica que ocorre e da estabilidade do arco. No mecanismo de transferência por spray com processo de soldagem em corrente contínua a temperatura na coluna do arco pode ser considerada estável. Por outro lado, a condição de transferência por curto-circuito, a temperatura de fusão do eletrodo é variável, deste modo, afeta a estabilidade dos gases e vapores na coluna do arco elétrico (WEGRZYN, 1980).

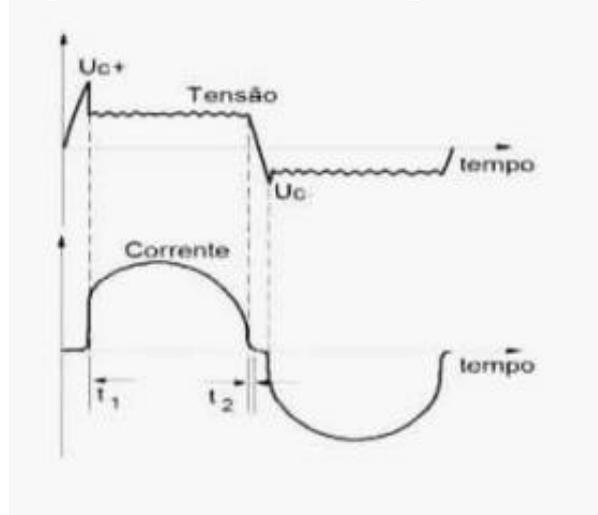
Segundo Modenesi (2012) o arco elétrico apresenta uma estrutura caracterizada por suas regiões de queda e de coluna do arco. A região catódica no arco elétrico, por ser a fonte primária de elétrons, tem efeito considerável na estabilidade do arco elétrico. No processo de soldagem TIG, com o eletrodo de tungstênio com polaridade inversa, os elétrons são emitidos por efeito termiônico e as características do eletrodo (geometria, condições de refrigeração e composição química) têm influência nas características operacionais do arco elétrico (MODENESI, 2012). Por outro lado, a coluna do arco e a região anódica, considerando a composição do gás de proteção como o hélio, afeta por exemplo, o seu potencial de ionização, densidade e condutividade térmica (MODENESI, 2012).

A transferência de metal de adição pode obter influência significativa na estabilidade operacional do arco elétrico na soldagem com eletrodo. A transferência de metal por *spray* tem características operacionais mais adequada para a estabilidade do arco elétrico (MODENESI, 2012). Entretanto, um processo de soldagem com transferência globular ou por curto-circuito tende a apresentar menor estabilidade, maior dificuldade para manter o arco elétrico, maior nível de respingos, maiores variações de corrente ou de tensão, maior nível de ruídos, além disso, a formação do cordão de solda descontínuo ou menos adequado (MODENESI, 2012). Mesmo para um processo com transferência por *spray*, diversos fatores podem levar a condições operacionais de estabilidade reduzida, o tipo de processo de soldagem, por exemplo GTAW ou GMAW, ou ainda, o tipo de gás de proteção utilizado.

3.5 O Efeito do Arco Elétrico em Corrente Alternada

A Corrente alternada é muito utilizada principalmente pelos processos de soldagem por Eletrodo Revestido, TIG e Arco Submerso (MODENESI, 2012). A soldagem com corrente alternada tem a estabilidade do processo relacionada com a mudança de polaridade do arco elétrico a cada semi-ciclo de corrente. O arco elétrico, a cada semi-ciclo, vai se apagar e se reacender, com uma polaridade diferente. No processo de soldagem TIG tem-se no semi-ciclo negativo no qual o eletrodo possui polaridade negativa, condições para a emissão de elétrons por efeito termiônico. O semi-ciclo positivo, também apresenta ação de limpeza devido a destruição da camada superficial de óxido pela a emissão de elétrons, importante na soldagem TIG do alumínio (MODENESI, 2012). Durante mudança de polaridade o arco elétrico é interrompido, deste modo, no início do ciclo a tensão tende a subir até um valor característico (U_{c+} ou U_{c-}) quando ocorre a reignição do arco elétrico. Segundo Modenesi (2012) no caso da soldagem TIG, o valor de U_{c+} tende a ser maior do que U_{c-} devido ao mecanismo de emissão de elétrons menos favorável que opera quando o eletrodo é positivo. Após a reignição do arco, a tensão cai para o seu valor de operação que é maior para o semi-ciclo positivo. No final de cada semi-ciclo, com a tensão tendendo para zero, o arco elétrico volta a ser interrompido (MODENESI, 2012). A Figura 3.4 ilustra o

Figura 3.4 Variações de corrente e tensão na soldagem TIG com corrente alternada.



Fonte: Modenesi (2012).

Na Figura 3.4, t_1 e t_2 são os tempos durante os quais o arco elétrico permanece apagado no início e término de cada semi-ciclo. U_{c+} e U_{c-} são as tensões de reignição dos arcos nos semi-ciclos positivo e negativo.

3.6 Efeito das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos no Processo de Soldagem SMAW

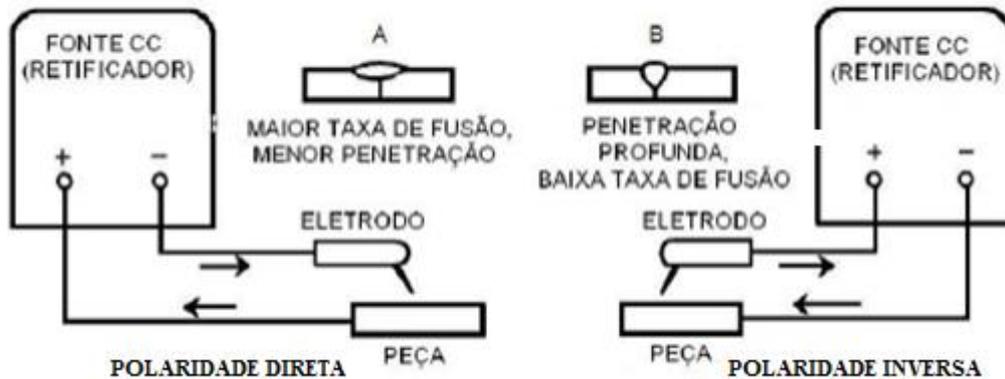
A utilização das configurações elétricas no processo de soldagem deve ser feita com cautela, pois nem sempre há uma relação direta entre as variáveis de soldagem e seus efeitos no metal base, pois estas variáveis de soldagem (corrente, tensão, velocidade de deslocamento, tipo de gás de proteção utilizado) afetam de modo diferente a intensidade do arco, a geometria do cordão de solda e o rendimento térmico do processo. Deste modo, embora o mesmo tipo de processo e configurações estabelecidas para a solda pretendida, é possível obter soldas com características completamente diferentes e eventuais alterações na microestrutura pela variação individual dos parâmetros de soldagem (MODENESI, 2003).

Uma das principais configurações utilizadas no processo SMAW é a corrente de soldagem e o tipo de eletrodo utilizado. De acordo com Wainer (2004), a corrente de soldagem é o mais importante efeito controlador de todas as características operatórias do processo, o aspecto do cordão e as propriedades da junta soldada. Além disso, é importante a observação de todas as variáveis do processo de soldagem.

3.6.1 O Efeito da Polaridade e da Corrente de Soldagem no processo SMAW

A soldagem com eletrodo revestido pode empregar tanto CA (Corrente Alternada) quanto CC (Corrente Contínua), de forma que o eletrodo pode ser ligado ao pólo positivo (polaridade inversa) ou ao pólo negativo (polaridade direta). Os fenômenos físicos que ocorrem nos pólos de um arco voltaico são diferentes. Alguns eletrodos funcionam bem em ambas as polaridades e outros somente com uma polaridade específica. A Figura 3.5 ilustra as conexões e os efeitos das polaridades.

Figura 3.5 Conexões e efeitos da corrente contínua



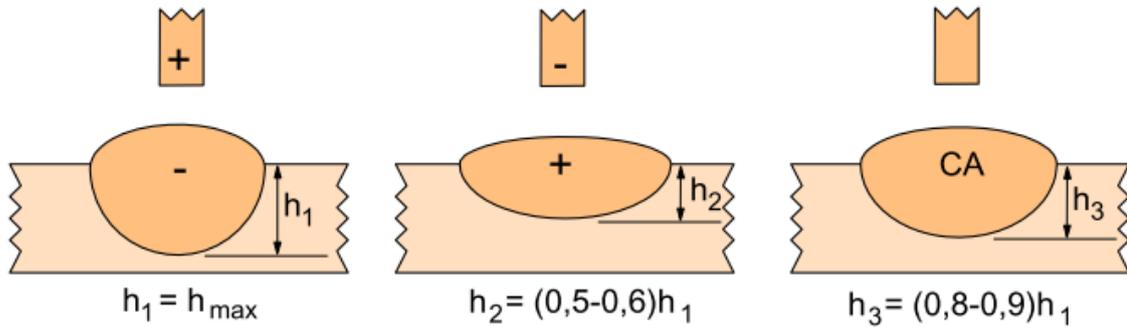
Fonte: Marques et al (2000).

O eletrodo com a polaridade direta produz soldas com menor penetração, no entanto, a taxa de fusão do eletrodo é alta. O cordão de solda é largo e raso como apresentado na Figura 3.5 A. Por outro lado, o eletrodo com a polaridade inversa produz soldas com maior penetração e um cordão de solda mais estreito como apresentado na Figura 3.5 B. Além da polaridade afetar a penetração e a taxa de fusão, o revestimento do eletrodo também apresenta influência considerável nas características do arco elétrico (MARQUES *et al*, 2000).

Segundo Modenesi *et al.* (2006) o tipo de corrente e a sua polaridade afetam a estabilidade do arco, modo de transferência de metal de adição, a forma e as dimensões da poça de fusão. Quando se utiliza corrente alternada, a penetração e taxa de fusão tendem a ter valores intermediários, mas a estabilidade do processo geralmente é inferior. Por outro lado, a soldagem com CA apresenta menos problemas com o sopro magnético.

O tipo de corrente e a polaridade devem ser consideradas em relação ao tipo e diâmetro do eletrodo, estes influenciam na forma, nas dimensões da poça de fusão, na estabilidade do arco e na transferência de metal de adição. A Figura 3.6 ilustra o efeito da polaridade direta e inversa, da corrente contínua e da corrente alternada.

Figura 3.6 Influência da polaridade e do tipo de corrente no processo SMAW.

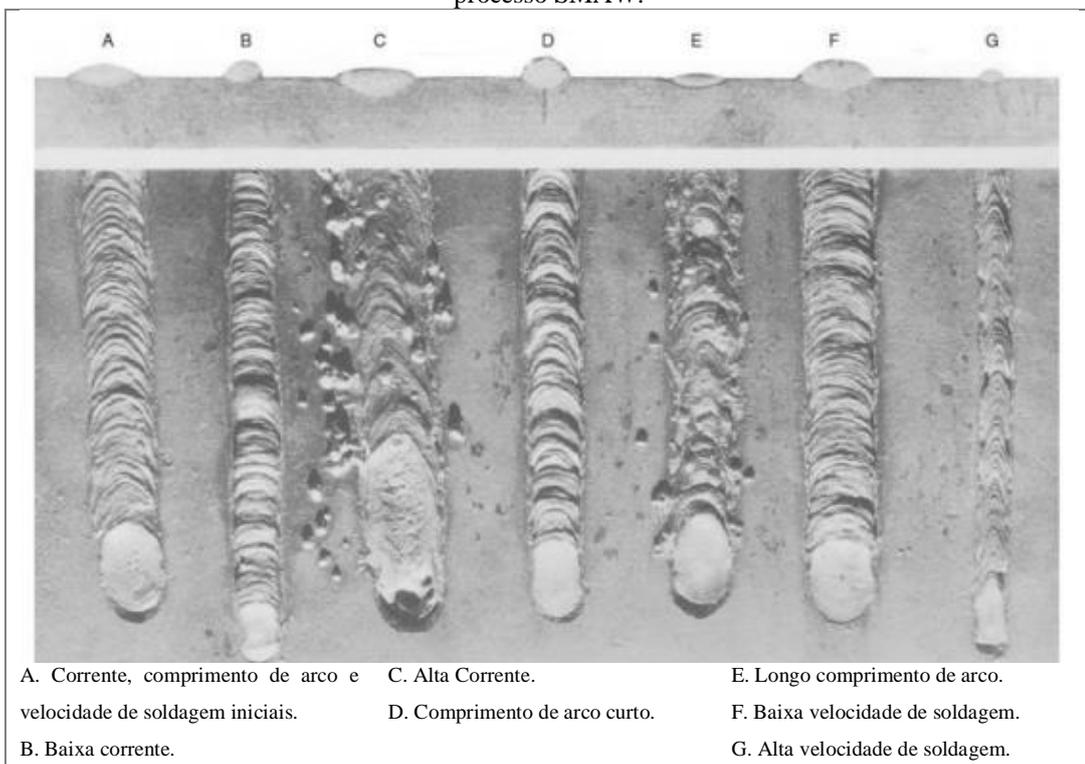


Fonte: Marques *et al.* (2007).

3.6.2 Parâmetros Geométricos no Processo de Soldagem SMAW

De acordo com Welding Handbook (2001), a velocidade de soldagem é definida como a taxa na qual o eletrodo se desloca ao longo da junta e influencia na penetração e no reforço do cordão de solda. Deste modo, altas velocidades de soldagem diminuem a penetração, acrescentam a rugosidade da superfície do cordão e podem gerar uma alta quantidade de inclusões de escória e porosidade. A Figura 3.7 apresenta o efeito da intensidade de corrente, velocidade de soldagem e comprimento do arco, sobre a morfologia de cordões de solda.

Figura 3.7 - Efeito da corrente, comprimento de arco e velocidade de deslocamento na junta na soldagem pelo processo SMAW.

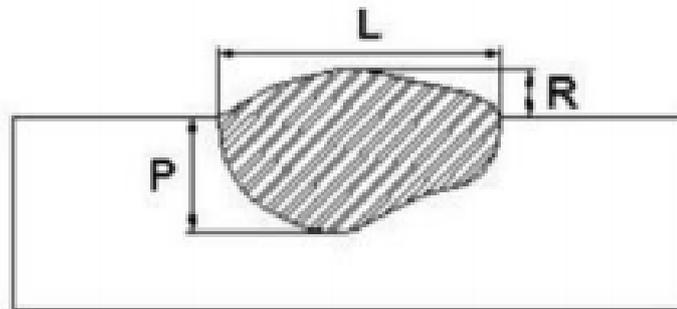


Fonte: Welding Handbook (2001).

3.6.3 Aspectos e Geometria dos Cordões de Solda no Processo SMAW

A avaliação da geometria da superfície plana do cordão de solda é realizada pela análise dimensional de sua seção transversal. Para o mesmo material e tipo de junta, a natureza do consumível, a corrente de soldagem, a tensão e a velocidade de soldagem tem interferência na geometria da solda. A geometria do cordão de solda tem influência na resistência mecânica da junta soldada. A Figura 3.8 representa o perfil geométrico do cordão de solda e estão indicadas as principais grandezas: a penetração (P), o reforço (R) e a largura (L) (ASSUNÇÃO, 2013).

Figura 3.8 - Representação das grandezas geométricas do cordão de solda



Fonte: Assunção (2013).

De acordo com Farias e Dutra (1993), a penetração na soldagem é obtida por pressão exercida pela força do arco sobre a poça fundida, a qual comprime a superfície líquida para uma penetração profunda. Essa força resulta da inércia de um fluxo de gotas metálicas ou de um jato de gás colidindo com a poça de fusão (SANTOS, 1995).

Para a intensidade de corrente, a penetração é inversamente proporcional à velocidade de soldagem e ao diâmetro do eletrodo. A largura do cordão de solda é tanto maior quanto maior for o diâmetro do arco e menor a viscosidade e tensão superficial da escória. Ela é inversamente proporcional à velocidade de soldagem e diretamente proporcional à tensão de soldagem e ao diâmetro do eletrodo, os quais afetam a área sobre a qual a força do arco é dissipada. De modo geral em CC, a largura aumenta com a corrente até um valor crítico, a partir do qual começa a diminuir. Em CA verifica-se pouco efeito da corrente sobre a largura da solda (FARIAS e DUTRA, 1993).

Com relação ao reforço do cordão de solda, sua forma é determinada pela largura da poça de fusão, pelo volume de metal adicionado, pela pressão hidrostática sobre o metal líquido, pela

presença de escória e, em correntes elevadas, pela velocidade de movimentação do metal líquido. Reduções na tensão, velocidade de soldagem e no diâmetro do eletrodo aumentam o reforço do cordão de solda. O reforço é maior em CC- e menor em CC+, com valores intermediários em CA (FARIAS e DUTRA, 1993).

3.6.4 A Influência da Corrente e do Metal de Adição de Soldagem SMAW em Aços Inoxidáveis Superduplex

De acordo com Belmonte Jr. *et al.* (2019) com o objetivo de pesquisar a eficiência de dois metais de adição na soldagem por eletrodo revestido e o comportamento da variação da corrente de soldagem em aços inoxidáveis superduplex, UNS S32760, os quais possuem características semelhantes dos aços duplex, no entanto, possuem maior resistência à corrosão, como por exemplo corrosão por pite. Foram analisados o balanceamento das fases presentes, a morfologia dos grãos e da junta soldada, a presença de fase sigma e a continuidade da propriedade de microdureza. Utilizou-se o processo de soldagem por eletrodo revestido, conforme parâmetros indicados na Tabela 3.1.

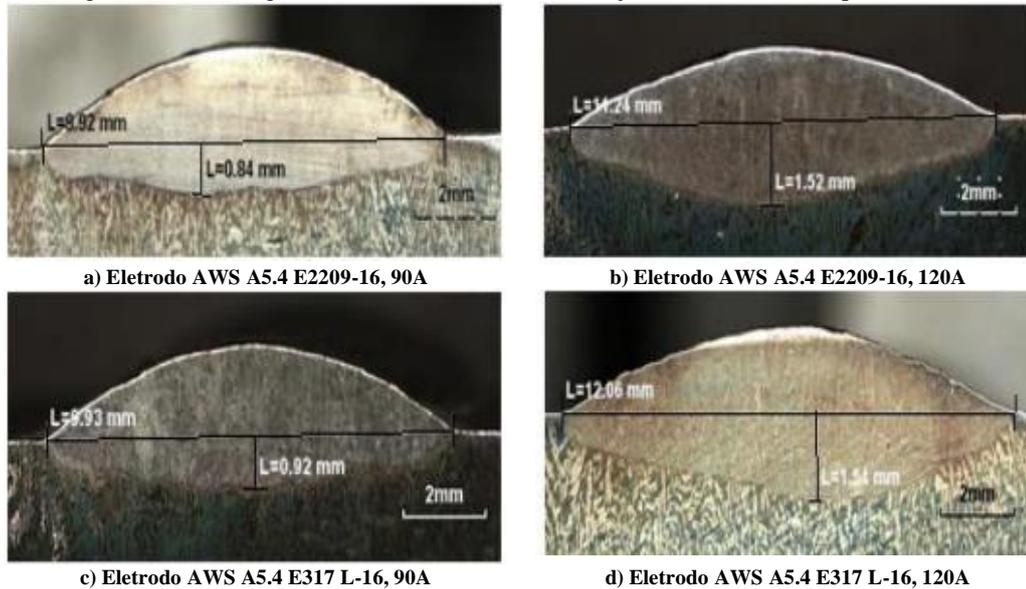
Tabela 3.1: Parâmetros para avaliar os efeitos da corrente e velocidade de soldagem de aços inoxidáveis superduplex, UNS S32760, pelo processo SMAW.

Condição	Eletrodo	Corrente de soldagem (A)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Tensão do arco (V)	Aporte térmico KJ/mm)
1	AWS A5.4 E2209-16	120	4,5	24,8	0,66
2	AWS A5.4 E2209-16	90	3,4	23,5	0,62
3	AWS A5.4 E317 L-16	120	4,8	24,8	0,62
4	AWS A5.4 E317 L-16	90	3,6	23,5	0,59

Fonte: Belmonte Jr *et al.* (2019).

E obtiveram os seguintes resultados conforme macrografia apresentada na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Macrografia dos cordões de solda, do aço UNS S32760; ataque Behara.10x.



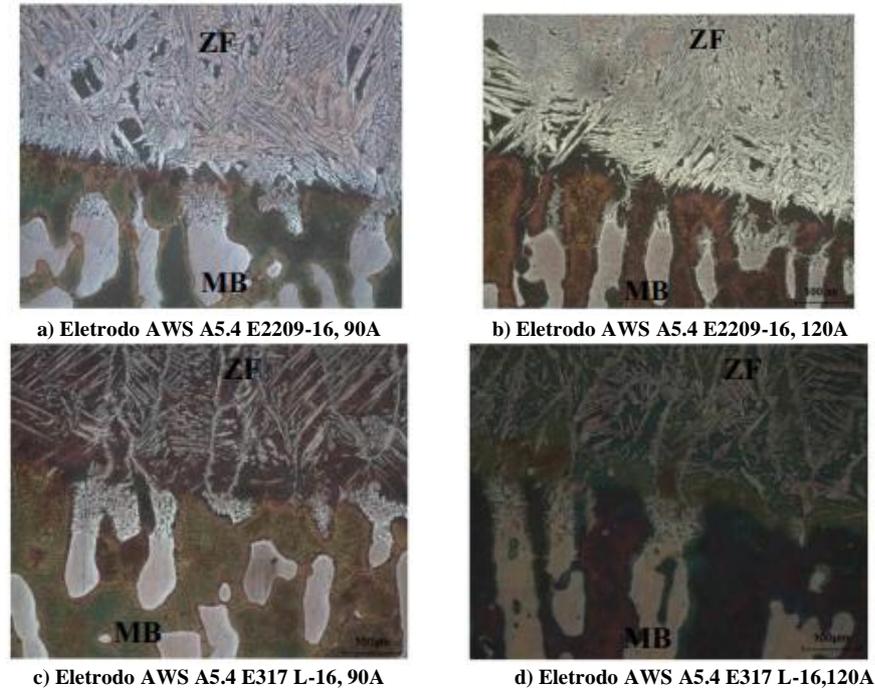
Fonte: Belmonte Jr *et al.* (2019).

A Figura 3.9 apresenta a macrografia de cada condição, indicando a penetração e largura dos cordões de solda. As juntas soldadas com 90A resultaram uma penetração de 0,8mm e 0,9mm para os eletrodos AWS A5.4 E2209-16 e AWS A5.4 E317 L-16, respectivamente. Valores inferiores aos encontrados para as juntas com 120A, que foram de 1,5mm para ambos os eletrodos. Como esperado, após aumentar a corrente de soldagem, a penetração do cordão de solda aumentou. Comportamento similar ao encontrado para a penetração também pode ser observado para a largura dos cordões de solda. Não foram observadas diferenças significativas na penetração e na largura do cordão quando comparadas as juntas soldadas de eletrodos diferentes, porém na mesma corrente de soldagem. O que indica que a diferença existente na composição química dos eletrodos testados neste ensaio, não influenciou na geometria do cordão (BELMONTE JR *et al.*, 2019).

De acordo com o experimento proposto apresentado na Figura 3.10, nas duas correntes de soldagem utilizando o eletrodo AWS A5.4 E2209-16 resultou em uma microestrutura contendo maior fração volumétrica de austenita, aproximadamente 65%, e o eletrodo AWS A5.4 E317 L-16, aproximadamente 35% de austenita. Ambas as condições se encontram dentro dos limites estabelecidos e não houve variação na fração volumétrica das fases presentes quando

comparadas as correntes de soldagem, 90 A e 120 A, para um mesmo eletrodo (BELMONTE JR *et al.*, 2019).

Figura 3.10 Micrografia da região de transição do metal base, Aço UNS S32760, para a zona fundida; ataque Behara. 200x. ZF: Zona Fundida; MB: Metal Base.



Fonte: Belmonte Jr *et al.* (2019).

3.7 Efeito das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos no Processo de Soldagem MIG/MAG

No processo de soldagem MIG/MAG é mais utilizado a polaridade inversa, pois apresenta a geometria do cordão de solda mais adequada, além disso, melhor desempenho. Por outro lado, com a utilização da polaridade direta, ocorre a repulsão da gota causada pelas forças dos jatos de plasma e de vapor metálico. A polaridade direta é utilizada para soldagem em situações que precisam de revestimento, pois a taxa de deposição é menor, a penetração é reduzida e apresenta menor estabilidade do arco elétrico. Entretanto, existem variações deste tipo de corrente, entre contínua ou alternada e pulsada.

A corrente contínua pulsada no processo de soldagem MIG/MAG tem-se uma gota por período de pulso. Deste modo, a transferência de uma gota por pulso apresenta diversas vantagens como baixo aporte térmico comparada com a polaridade inversa, melhor controle do material depositado, geometria do cordão uniforme, redução da produção de salpicos, possibilidade de

cordões de solda em chapas de espessuras menores, pode ser utilizado para soldagem em todas as posições (MACHADO, 1996; GOHR, 2002; ANDRADE, 2012).

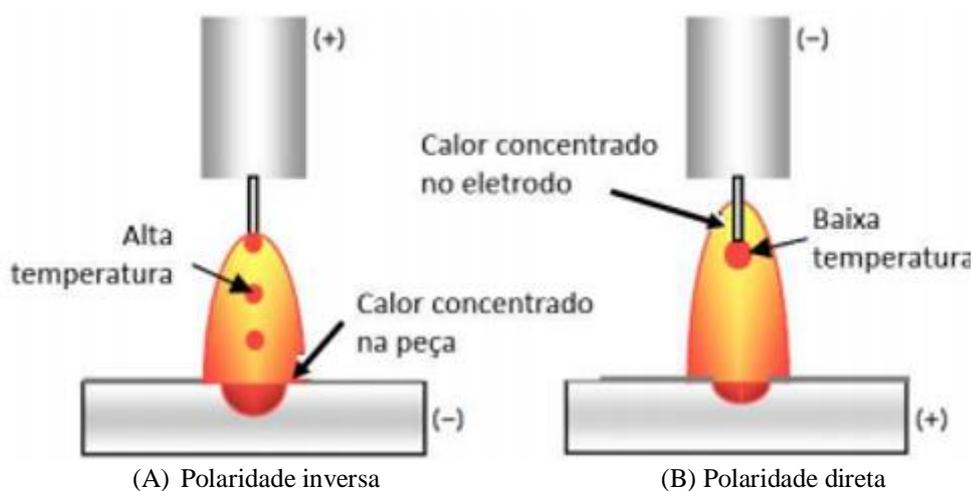
3.7.1 Processo de Soldagem MIG/MAG com Polaridade Variável

O processo de soldagem MIG/MAG é utilizado em vários setores, para a produção de cordões de solda na fabricação de automóveis, equipamentos de médio e grande porte, como pontes, vigas, escavadeiras, tratores, entre outros. Porém alguns problemas são encontrados, principalmente na soldagem de alumínio, por exemplo, excesso de fusão e distorções. De acordo com Tong *et al.* (2001), o processo de soldagem MIG/MAG com a utilização de corrente alternada seria mais indicado para resolver algumas das dificuldades de soldagem mencionadas, como no caso do alumínio. O processo MIG/MAG é encontrado na literatura com duas nomenclaturas distintas: Corrente alternada pulsada (CA) ou polaridade variável (PV).

Segundo Nascimento e Vilarinho (2006), as duas formas de nomenclatura estão relacionadas com a utilização da polaridade no processo de soldagem. Entretanto, entende-se que a corrente alternada está vinculada à forma de onda senoidal, onde a parte positiva e a parte negativa são muito próximas de igual módulo. Logo, a expressão polaridade variável está mais relacionada com formas de onda e com a variação entre as polaridades na curva de corrente de soldagem, podendo conter maior tempo e intensidade em sua parte positiva, ou da parte negativa. A polaridade negativa altera o comportamento do processo MIG/MAG, modificando a distribuição de energias entre o eletrodo e a peça.

Conforme apresentado por Kim *et al.* (2007) na Figura 3.11, no processo com polaridade inversa, a maior parte da concentração de calor acontece na peça. Por outro lado, na polaridade direta, essa situação se inverte sendo maior parte do calor concentrado no eletrodo, sendo assim, ocorre aumento da taxa de fusão do eletrodo, aumento da tensão do arco elétrico, diminuição da temperatura na peça e redução da penetração.

Figura 3.11– Comportamento do arco elétrico em polaridade inversa (A) e direta (B) na soldagem GMAW.



Fonte: Kim *et al.* (2007).

De acordo com Park *et al.* (2009) verificaram a redução na temperatura da peça soldada com o aumento da utilização do eletrodo negativo comparado com o MIG/MAG convencional.

A alta taxa de fusão, à baixa temperatura no metal base geram grandes instabilidades no arco elétrico e na taxa transferência do metal desde a ponta do eletrodo até a peça, na grande maioria das situações impossibilitando a utilização de CC- no processo MIG/MAG. Segundo Talkington (1998) a instabilidade é devido ao modo de transferência metálica, que se limita ao modo globular para CC-. Deste modo, para obter as vantagens de se utilizar a polaridade direta no processo MIG/MAG, como a redução da penetração, redução da temperatura no metal base, é aplicado ao processo o eletrodo positivo, e conseqüentemente traz a estabilidade do arco elétrico.

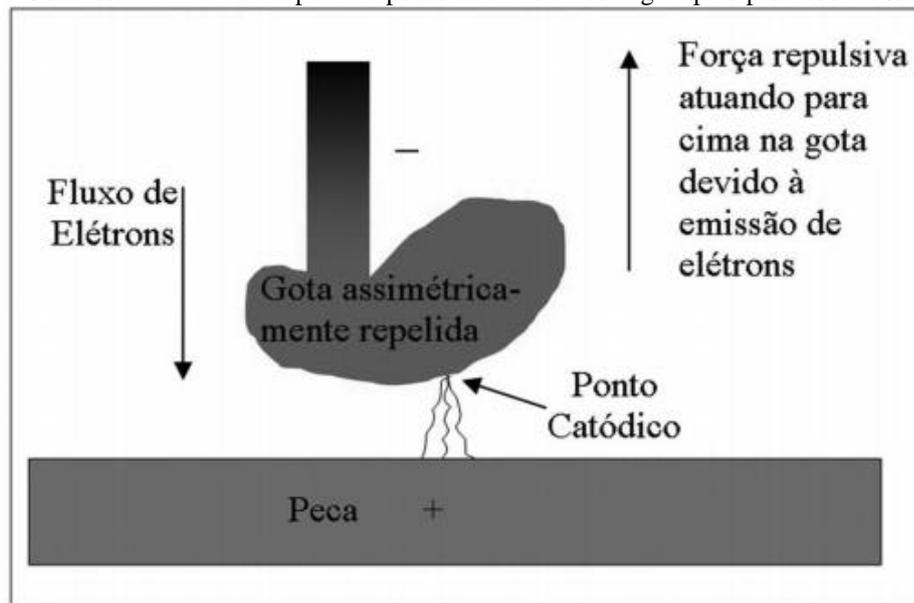
O controle do calor da peça, do eletrodo e o controle da penetração no processo de soldagem, possibilita um balanço de calor, obtido pela polaridade. E segundo Dutra *et al.* (2015), esta combinação de polaridades geram baixas temperaturas e aumento da taxa de produtividade no processo de soldagem. A combinação das polaridades é realizada devido a utilização de pulsos de correntes, desta maneira, denominada como polaridade variável (JOSEPH *et al.*, 2003).

3.7.2 A Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG

Os principais fatores que afetam esse processo de soldagem são as composições químicas dos arames eletrodos e dos gases de proteção, e conseqüentemente afetam as propriedades mecânicas, metalúrgicas e os modos de transferência metálica.

A soldagem MIG/MAG utilizada pela polaridade direta, segundo Talkington (1998), é limitada, de modo geral, à transferência globular e é pouco utilizada neste processo de soldagem, pois o arco elétrico é instável e os respingos produzidos são indesejáveis. A maior dificuldade em relação a soldagem em polaridade direta é a força catódica repulsiva que atua na extremidade fundida do eletrodo e os elétrons são emitidos do eletrodo e transferidos à superfície da peça. Esta força de reação é a principal causa para gotas repelidas durante a soldagem em CC- pelo processo MIG/MAG (LANCASTER, 1986). Este autor ilustra uma instabilidade do ponto catódico que se forma na extremidade da gota fundida durante a soldagem, o ponto catódico é identificado por uma intensa concentração de luz emitida de uma área localizada da gota que se destaca em meio ao arco elétrico. Observa-se o ponto catódico em torno de uma gota quando ela é repelida de forma assimétrica conforme ilustra a Figura 3.12.

Figura 3.12 Gota assimetricamente repelida e ponto catódico na soldagem pelo processo MIG/MAG em CC-



Fonte: Lancaster (1986).

As gotas repelidas acontecem também devido ao tipo de gás de proteção, mesmo em polaridade inversa (SCOTTI, 1998). De acordo com Jönsson *et al.* (1995), o efeito do gás de proteção He fornece gotas deformadas e são produzidas devido a um fluxo de gás, jato de plasma, na direção da peça em relação a gota.

A vantagem para a utilização do processo de soldagem GMAW com polaridade direta é o balanço reverso de calor produzido no arco elétrico. A polaridade direta produz maior taxa de fusão, mas com uma transferência globular repelida e um cordão de baixa penetração.

De acordo com Souza *et al.* (2009) experimentos do LAPROSOLDA (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem), da Universidade Federal de Uberlândia, constataram que a polaridade direta em alguns casos não conduzia à baixa penetração ou que a transferência metálica não era apenas do tipo globular repulsiva. Além disso, outras pesquisas mostraram que arames aditivados em CC+ ou CC- fazem com que a taxa de fusão se igualem (SOUZA *et al.*, 2009).

Experimentos foram realizados por Souza *et al.* (2009) com o objetivo de verificar os efeitos da composição do gás de proteção, do nível de corrente e da polaridade direta e inversa sobre os modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG. Os resultados dos experimentos indicaram que para mesma corrente, a soldagem com polaridade direta leva a uma maior taxa de fusão. Nas condições de soldagem estabelecidas obteve-se transferência globular (baixa corrente) e goticular (alta corrente) com polaridade direta. O comportamento do arco elétrico na soldagem em polaridade direta do processo MIG/MAG, explica algumas características específicas como a maior instabilidade do arco elétrico que provoca maiores variações nos sinais de corrente e o aumento das quantidades de respingos (SOUZA *et al.*, 2009).

A maior quantidade de respingos em CC- mencionada na literatura deste trabalho foi observada quando se utilizou a mistura com Ar+18% CO₂. Segundo Souza *et al.* (2009) os resultados confirmaram a maior taxa de fusão com CC- e isso se deve mais à subida do arco pelas paredes da ponta do arame em procura por óxidos (para emissão por campo), aumentando a eficiência térmica, do que por um maior calor gerado na conexão catódica. O gás de proteção influencia os parâmetros geométricos de forma diferente dependendo da polaridade usada, o Ar+2% O₂ proporciona perfil de cordão em CC- com baixa molhabilidade, formato inadequado, mas com uma certa capacidade de penetração. (SOUZA. *et al.*, 2009).

3.7.3 A Influência da Polaridade nas Características dos Cordões de Solda e no Comportamento do arco na Soldagem MIG/MAG de Aços ao Carbono

Experimentos feitos por Cirino, (2009) com o processo de soldagem MIG/MAG em CC+ e CC-, e o principal objetivo foi verificar a influência da polaridade sobre as dimensões da zona fundida, o comportamento do arco voltaico e aparência superficial dos cordões de solda. Além disso, foram mencionadas questões como a taxa de fusão, a geração de respingos e o efeito do gás de proteção sobre a estabilidade do processo em polaridade direta. O arame de solda

utilizado no experimento foi o ER 70S-6 e os corpos de prova foram de aço comum ao carbono SAE 1020.

Segundo Cirino, (2009) o uso de argônio puro como gás de proteção acarreta instabilidade do arco elétrico na condição CC-. Deste modo, a boa estabilidade do processo em CC- e a boa aparência superficial dos cordões de solda obtidos pode ser atribuída à presença de O₂ no gás de proteção (Ar + 2% O₂). Esta mistura de gases propiciou a oxidação da gota metálica e do eletrodo, desta forma amenizou o efeito da polaridade negativa sobre a gota metálica. A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros do teste realizado.

Tabela 3.2 Parâmetros para os ensaios realizados em diferentes condições de polaridade e velocidade do processo de soldagem MIG/MAG.

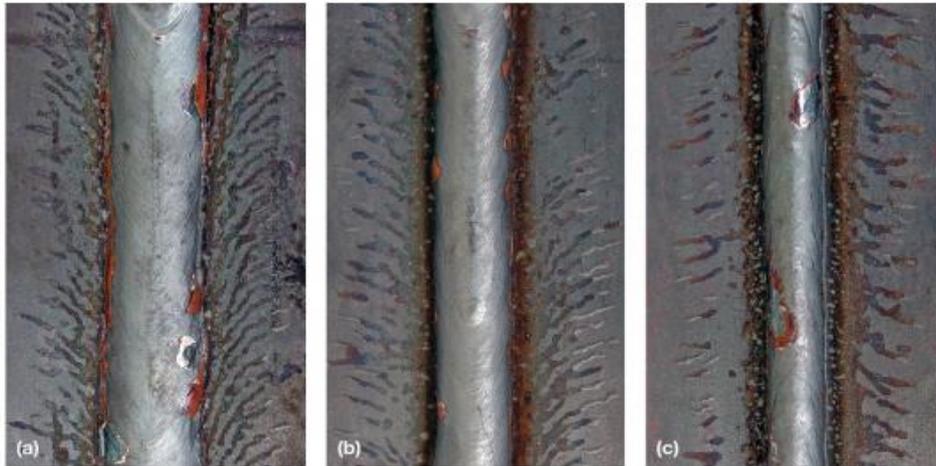
Teste	Condição	Velocidade de alimentação de arame (mm/s)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Tensão (V)	Corrente (A)
(a)	CC+	125,0	5	31	259
(b)	CC-	191,7	5	30	263
(c)	CC-	191,7	7,6	30	259

Fonte: Cirino (2009).

De acordo com os dados da tabela 3.2 correspondentes às condições de soldagem estabelecidas, apresenta o aspecto superficial dos cordões de solda (a), (b) e (c). Em (a) observa-se um cordão contínuo e largo em comparação à (b) e (c), características típicas de uma soldagem MIG/MAG com polaridade inversa operando no modo de transferência goticular. O cordão (b) apresenta uma largura menor que o anterior, porém com a aparência superficial semelhante, não havendo presença de descontinuidades ou de respingos próximos a região da solda. Em (c) o cordão apresenta a largura mais estreita que em (b), em função do menor volume da poça de fusão e do menor aporte de calor no metal base. Também não há presença de respingos na região de

solda ou discontinuidades que pudessem evidenciar maiores instabilidades no processo, conforme apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13 Aparência superficial dos cordões de solda para as condições (a), (b) e (c) do aço carbono SAE 1020.

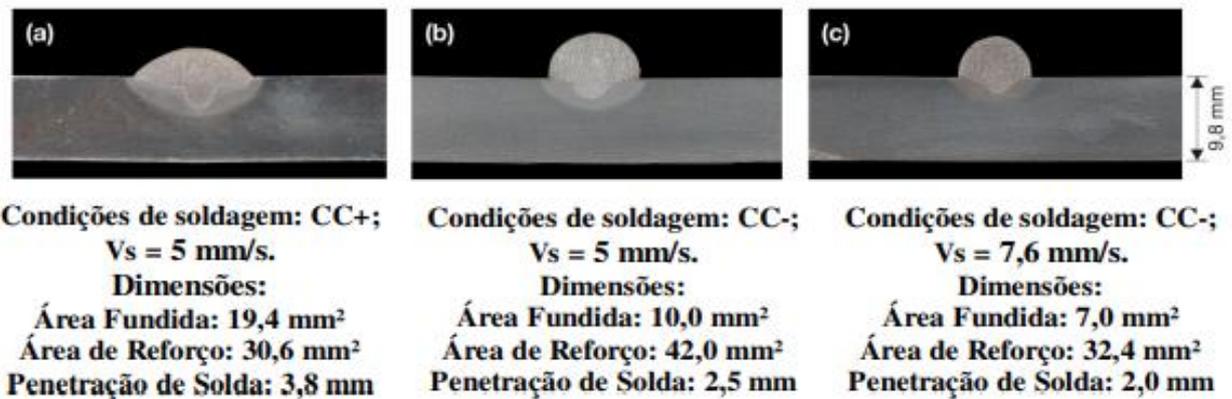


Fonte: Cirino (2009).

3.7.4 A Influência da Polaridade sobre a Geometria do Cordão de Solda

As macrografias acompanhadas das principais condições de soldagem MIG/MAG e dos resultados das medições realizadas em cada amostra do aço carbono SAE 1020. Segundo Cirino (2009) uma avaliação do experimento entre (a) e (b), que foram realizadas com a mesma velocidade de soldagem, a mudança de polaridade em (b) resultou em uma diminuição considerável de penetração de solda, na área fundida e um aumento na região do reforço em relação a (a). Em (c), a profundidade de penetração é menor do que em (b), assim como a área de reforço. Este resultado foi atribuído à maior velocidade de soldagem, considerando que a polaridade, corrente de soldagem e gás de proteção foram os mesmos (Cirino, 2009). Estes resultados são verificados conforme apresentado na Figura 3.14.

Figura 3.14 - Macrografias referentes aos ensaios (a), (b) e (c) da soldagem MIG/MAG do aço carbono SAE 1020.



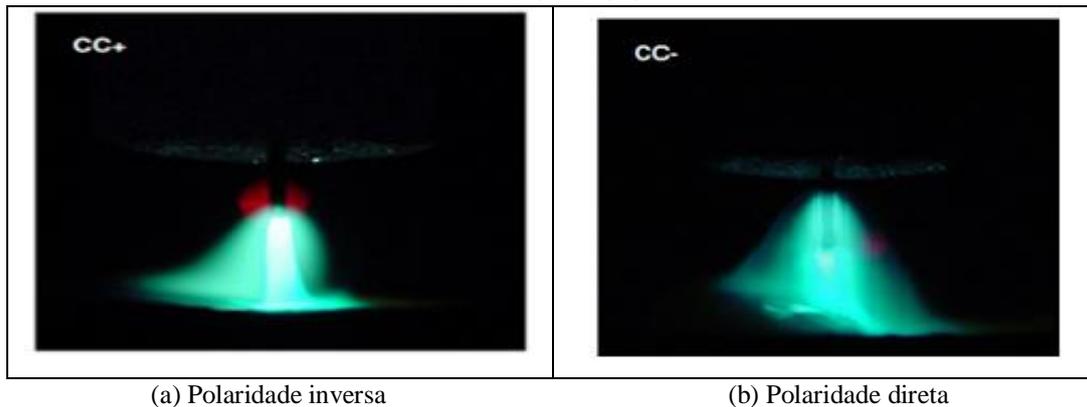
Fonte: Cirino (2009).

3.7.5 A Influência da Polaridade sobre o Comportamento do Arco Elétrico

Fotografias do arco voltaico em ambas as polaridades são apresentadas segundo Cirino (2009) a fotografia “a” correspondente a condição CC+, mostra um arco com um núcleo central de alta energia e uma zona externa de menor energia, que de acordo com a literatura é uma característica típica de arcos em atmosferas de argônio (AWS, 1991). O ponto de contato do arco com o arame eletrodo se dá na extremidade do eletrodo. Na fotografia “b” correspondentes a condição CC- é nítido que o ponto de contato se dá na extensão sólida do arame eletrodo e menos evidente o núcleo de alta energia.

A taxa de fusão foi 53% maior em CC- em relação a CC+, nas condições de soldagem dadas com gás de proteção Ar + 2% O₂ e de acordo com a variação da corrente esta proporção pode ser alterada (CIRINO, 2009). A Figura 3.15 ilustra o comportamento do arco voltaico.

Figura 3.15 Fotografias do arco voltaico em CC+ e em CC- dos ensaios da soldagem MIG/MAG do aço carbono SAE 1020.



Fonte: Cirino (2009).

3.8 Efeito das Configurações Elétricas Sobre os Parâmetros Geométricos no Processo de Soldagem TIG

Variáveis importantes que determinam o processo de soldagem são a tensão, comprimento do arco, a corrente de soldagem, a velocidade de avanço e o gás de proteção. Deve-se considerar que as variáveis não agem de forma independente, existe interações consideráveis entre elas. A utilização de gás de proteção, como argônio, hélio ou mistura gasosas como argônio-nitrogênio, argônio-hidrogênio, além das variáveis como a corrente de soldagem, pode proporcionar efeitos no cordão de solda ou do metal base considerado. No caso do gás de proteção, ao utilizar-se o gás hélio é possível obter uma solda com maior penetração, devido ao maior potencial de ionização deste gás. Em relação à corrente de soldagem, de forma geral, controla a penetração da solda, com efeito diretamente proporcional. Além disso, a corrente afeta a tensão do arco, sendo que para um mesmo comprimento de arco, um aumento na corrente causará um aumento na tensão do arco. A soldagem com polaridade direta oferece elevada penetração e maiores velocidades de soldagem, enquanto a corrente alternada é eficaz quando na soldagem de materiais com óxidos refratários, como alumínio e magnésio, pois pode-se realizar a chamada limpeza catódica, quando o eletrodo se encontra no pólo positivo (BRACARENSE, 2000).

A maior parte dos metais pode ser soldados pelo processo TIG, entretanto, para soldar metais como cádmio, zinco e estanho devido à baixa pressão de vapor dos líquidos destes metais, em geral, melhores resultados são obtidos com polaridade direta.

AÇOS CARBONO E DE BAIXA LIGA: Em geral é mais utilizado o gás argônio no processo de soldagem por TIG e o gás hélio ou mistura de gases (Ar + He) para o processo de soldagem por TIG automático (WAINER *et al.*, 2004). Nestes materiais, a qualidade do gás de soldagem é mais dependente das contaminações no metal de base do que nos processos SMAW ou GMAW devido à ausência dos fluxos para remoção das impurezas. Argônio é utilizado em espessuras de até 12 mm. Na soldagem de maiores espessuras são utilizados o argônio e misturas argônio-hélio (BRACARENSE, 2000).

LIGAS DE ALUMÍNIO: Para a soldagem destes materiais, o mais adequado é o processo de soldagem por TIG, podem ser realizadas também em operações de soldagens autógenas. Em geral, é utilizada CA devido à limpeza catódica. Na soldagem de superfícies finas algumas vezes é utilizado a soldagem com polaridade inversa. Para seções mais espessas utiliza-se polaridade direta com gás de proteção Hélio em processos automáticos, neste caso, devido à ausência de limpeza catódica é importante que se faça uma limpeza antes do processo. O gás de proteção Argônio é o mais utilizado por obter melhor limpeza, mais favorável para iniciar o arco elétrico e além do mais, melhor qualidade de solda (BRACARENSE, 2000; WAINER *et al.*, 2004).

LIGAS DE MAGNÉSIO: As ligas de magnésio têm comportamento semelhantes às das ligas de alumínio nas operações de solda, desta forma, a soldagem por TIG com CA é mais indicada. O arco é mais estável quando se utiliza o gás de proteção Argônio (BRACARENSE, 2000; WAINER *et al.*, 2004).

LIGAS DE COBRE: A soldagem por TIG do cobre e suas ligas não se utiliza muito misturas gasosas, entretanto, misturas de argônio com até 30 % de nitrogênio ou hélio oferecem como vantagens o maior aporte térmico e velocidades de soldagem mais altas, em comparação com o argônio puro. A maioria das ligas de cobre é soldada com polaridade direta com proteção de hélio, devido à alta condutividade do cobre (BRACARENSE, 2000; WAINER *et al.*, 2004). Para o cobre desoxidado é mais adequado o uso do gás Hélio + 25% de Argônio, obtém um arco mais estável e adequado para chapas com até 1,5mm de espessura (WAINER *et al.*, 2004).

LIGAS DE NÍQUEL: Em geral, são soldadas por polaridade direta com gases de proteção de Ar, He e as misturas entre esses. Quando utiliza o gás Argônio obtém um arco mais estável e de fácil controle de solda, e o gás Hélio indicado para soldagem automática com alta velocidade. (BRACARENSE, 2000; WAINER *et al.*, 2004).

Metais ferrosos, tais como os aços inoxidáveis, são soldados na condição CC-. Nesta condição, a corrente é conduzida através do plasma por íons e também por elétrons que são emitidos pelo cátodo de tungstênio (BRACARENSE, 2000). A utilização do gás Hélio obtém penetração mais uniforme e com menor ZTA (Zona Termicamente Afetada).

Alguns metais, como o alumínio, a soldagem na condição CC- não é muito favorável. O aspecto mais relevante, e que torna necessário o emprego de recursos diferenciados para a soldagem TIG do alumínio, é uma camada microscópica de óxido do mesmo metal, neste caso Al_2O_3 (material cerâmico e mal condutor elétrico) que se forma sobre sua superfície e que se danificada, rapidamente se reconstitui na maioria dos ambientes (AWS, 1991). Esta camada de óxidos garante ao alumínio alta resistência à corrosão atmosférica, porém se constitui na principal dificuldade da soldagem a arco do alumínio e suas ligas. Durante a soldagem TIG pode ocorrer aquecimento excessivo no eletrodo, fundi-lo, e promover inclusões no metal de solda.

Segundo Ken-Hicken (1993) a barreira de óxidos tem alto ponto de fusão, cerca de 2060°C temperatura que a princípio não seria um problema, já que o arco atinge temperaturas muito superiores a esta, de modo que se poderia supor que esta barreira seria facilmente fundida. Entretanto, no processo TIG na condição CC-, isto não acontece, pois, a alta condutividade térmica do alumínio permite que o calor rapidamente se difunda através da peça a ser soldada fundindo-a, porém, mantendo o óxido praticamente intacto. Os aços, assim como as ligas de alumínio, formam camadas de óxidos sobre suas superfícies e o ponto de fusão destas é próximo ao do substrato. Além disso, a difusividade térmica dos aços é menor.

3.8.1 O Efeito da Corrente Contínua no Processo GTAW

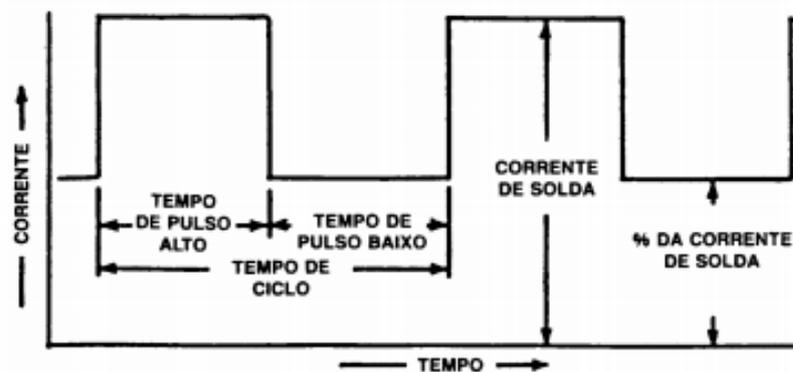
Em corrente contínua, na maioria dos casos utiliza-se polaridade direta com os elétrons fluindo do eletrodo para a peça e os íons no sentido contrário. Deste modo, 70 % do calor estará na peça

e somente 30 % do calor no eletrodo. Desta forma, além de preservar o eletrodo, também obtém maior penetração. Quanto ao efeito de limpeza catódica, propiciada pela saída de elétrons da peça, a polaridade inversa pode ser utilizada. Esta limpeza catódica é importante na soldagem de materiais que tem óxidos refratários, no entanto, esta forma de operação por manter o eletrodo muito aquecido, necessita de eletrodos de diâmetro maiores, ficando a capacidade do eletrodo neste procedimento em cerca de um décimo do que quando operando em polaridade direta.

3.8.2 O Efeito da Corrente Contínua Pulsada no Processo GTAW

A corrente contínua pulsada envolve a variação repetitiva da corrente do arco entre um valor mínimo e um valor máximo, controlando-se o tempo do pulso, o tempo no valor mínimo, nível de corrente máximo e nível de corrente mínimo. Apresentada na figura 3.16.

Figura 3.16 Gráfico de tensão / corrente para fonte pulsada no processo GTAW



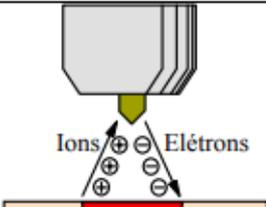
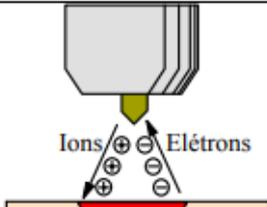
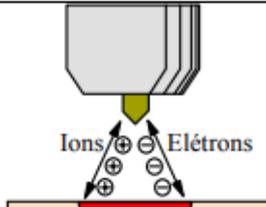
Fonte: Bracarense (2000).

3.8.3 O Efeito da Corrente Alternada no Processo GTAW

No processo de soldagem TIG com CA é favorável, pois tem o aproveitamento da limpeza catódica do processo na utilização da polaridade inversa e obtém a penetração mais profunda quando utiliza a polaridade direta na soldagem a arco elétrico. Entretanto, quando em operação, diversos fenômenos podem ocorrer e devem ser analisados. Ao tornar-se negativo, o eletrodo de tungstênio a partir da emissão termiônica fornece elétrons para a reignição do arco, e passa pelo ponto de corrente zero. Entretanto, ao tornar-se positivo o mesmo não ocorrerá, pois, a peça não poderá suprir elétrons até que um determinado nível de tensão seja atingido. Isto

mostra diferentes aspectos como área mais extensa da poça e mudança de direção dos elétrons. Este efeito é ilustrado pela figura 3.17.

Figura 3.17 Apresentação de soldagem GTAW relacionadas com o tipo e polaridade da corrente.

Tipo de Corrente:	CC-	CC+	CA
Fluxo de elétrons e ions:			
Perfil do cordão:			
Limpeza de óxido:	Não	Sim	Sim (meio ciclo)
Balanco de calor (aprox.):	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo

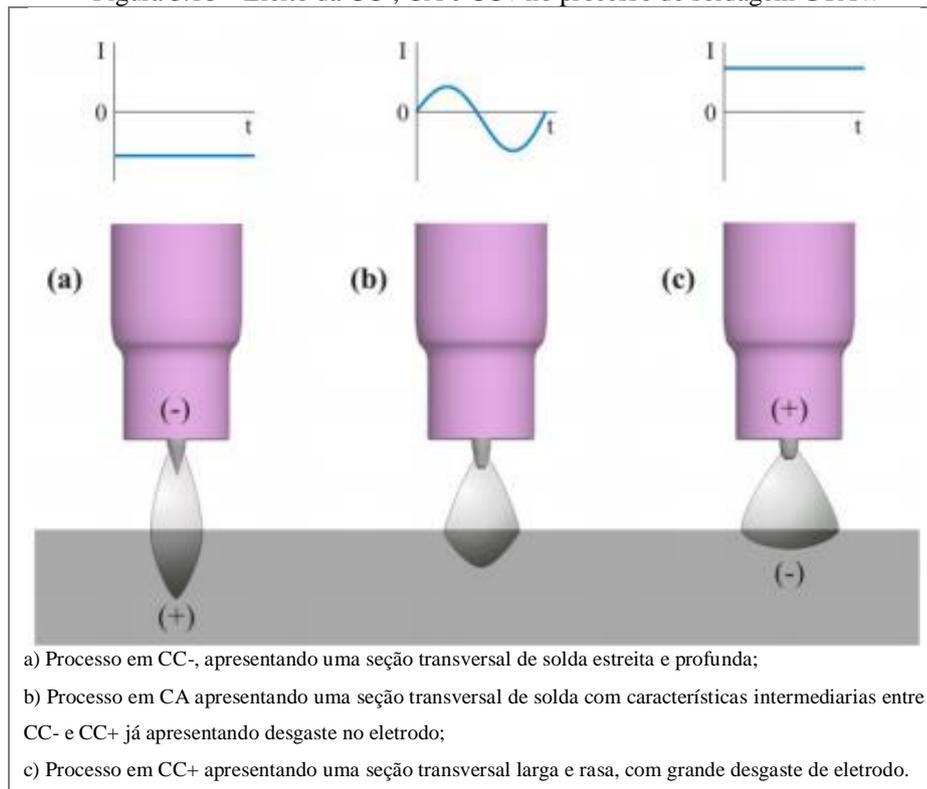
Fonte: Quites (1979).

3.8.4 O Efeito da Polaridade sobre as Dimensões do Cordão de Solda no Processo TIG CA

O processo de soldagem TIG com CA aplicado ao alumínio por exemplo, induz a suposição de que um maior tempo de atuação da polaridade negativa em relação à polaridade positiva produz cordões de solda com maior penetração e o aumento do tempo de atuação da polaridade positiva conduz a uma maior ação de remoção de óxidos, porém, diminuindo a penetração de solda (MARQUES, 2005; MATHERS, 2002; ASM, 1993).

Uma soldagem nesta condição resultaria em cordões de solda estreitos e profundos. A situação seria oposta quando na condição CC+, gerando cordões mais largos e menos profundos. A situação intermediária é o processo com variação de polaridade considerado um balanço de 50% do calor gerado imposto à peça e 50% do calor gerado imposto ao eletrodo de tungstênio. A Figura 3.18 ilustra o processo de soldagem GTAW.

Figura 3.18 – Efeito da CC-, CA e CC+ no processo de soldagem GTAW



Fonte: Cirino (2009).

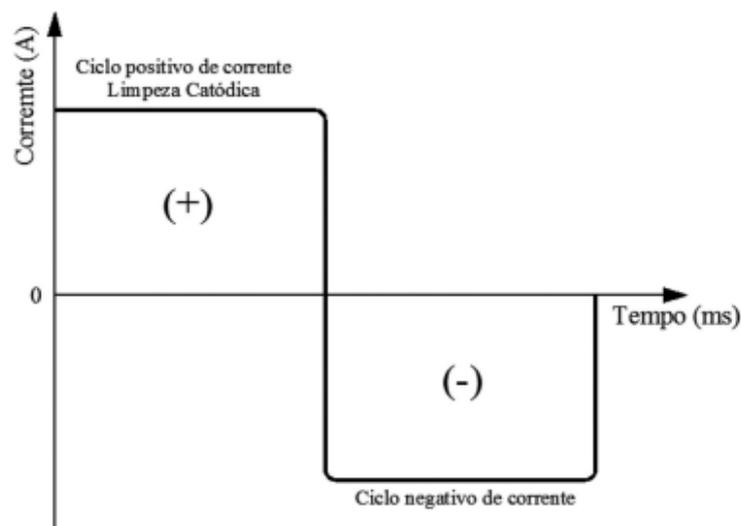
3.8.5 A Influência do Tempo de Atuação da Polaridade Positiva na Soldagem TIG CA do Alumínio

Experimentos conduzidos por Cirino e Dutra (2009) com o objetivo de determinar o comportamento de fusão diante do aumento do tempo de atuação da polaridade positiva na soldagem TIG CA do alumínio 1200. A intensidade da corrente elétrica foi a mesma em ambas as polaridades, apenas os tempos de duração de cada polaridade foram modificados. Segundo Cirino e Dutra (2009) em relação ao comportamento de fusão, um aumento na penetração e nas áreas de fusão foi verificado à medida que maiores tempos de polaridade positiva foi utilizado. Este comportamento difere daquele indicado comumente pela literatura citado por Mathers (2002) e Ken-Hicken (1993) sobre processos de soldagem com eletrodos não consumíveis, implicando em diminuição na penetração com o aumento do tempo de atuação da polaridade positiva. Entretanto, esta tendência crescente constatada durante os experimentos ocorre a partir de um determinado ponto, onde os tempos de atuação da polaridade positiva são maiores do que 4,0 ms (tempo de polaridade positiva) em um período total de 20,0 ms. A alta capacidade de fusão obtida em soldas realizadas com altos tempos de atuação da polaridade positiva foi

atribuída a fenômenos decorrentes da emissão de elétrons por efeito de campo que ocorre durante as fases de eletrodo positivo.

O fenômeno da limpeza catódica tem grande importância técnica na soldagem do alumínio. Uma operação de soldagem utilizando o eletrodo de tungstênio com a polaridade inversa obtém instabilidade de arco e intenso desgaste do eletrodo. A situação mista é denominada de corrente com polaridade variável, devido às formas retangulares com que as fontes de soldagem produzem a corrente alternada, ilustrado na figura 3.19. Com isso, os mecanismos de emissão se alternam entre o efeito termiônico e o efeito de campo, tornando possível um balanceamento de todos os efeitos envolvidos.

Figura 3.19 - Formato de onda retangular para o processo TIG com CA (regulada em 50% eletrodo positivo e 50% eletrodo negativo).



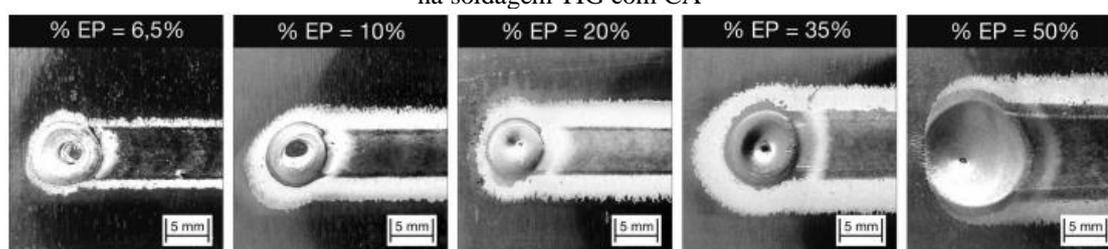
Fonte: Cirino (2009).

As fontes eletrônicas, que possuem formato de onda retangular, têm uma vantagem sobre as fontes eletromagnéticas. No formato de onda senoidal, a transição da polaridade negativa para a positiva ocorre de forma gradativa, conduzindo a um maior tempo para extinção de arco, tornando mais difícil a sua re-ignição. Por outro lado, o formato de onda de corrente retangular reduz esta desvantagem, pois a transição entre a polaridade negativa e positiva ocorre de forma quase instantânea. Deste modo, uma polaridade que predomina sobre a outra pode ser regulada com a frequência de inversão de polaridade, permitindo utilizar um maior tempo de atuação de polaridade negativa em relação ao tempo de atuação da polaridade positiva. O entendimento geral sobre o processo TIG com CA pressupõe de que um maior tempo de atuação da polaridade negativa em relação à polaridade positiva produz cordões de solda com

maior penetração e aumento do tempo de atuação da polaridade positiva, diminui a penetração e obtém uma maior ação de remoção de óxidos (GERKEN, 1991); (MATHERS, 2002).

Pesquisadores determinaram uma relação de proporção direta entre o tempo de atuação da polaridade positiva e as características da zona fundida, na situação em que a polaridade positiva predominava sobre a polaridade negativa em um liga de Al-Mg 5083 (YARMUCH; PATCHETT, 2007). Deste modo, foi confirmado na pesquisa de Cirino e Dutra (2009) que a menor penetração ocorre para um %EP (percentual de eletrodo positivo) até cerca de 20%. Após isto, a penetração aumenta, conforme apresentado na figura 3.20.

Figura 3.20 A relação entre %EP e a profundidade de penetração (mm) do alumínio 1200 na soldagem TIG com CA



Fonte: Cirino e Dutra (2009).

As maiores profundidades de penetração e áreas fundidas foram encontradas em percentuais de eletrodo positivo onde o efeito de campo teve papel importante na emissão de elétrons, e deste modo contribuíram para maior fusão do metal base (CIRINO e DUTRA, 2009).

3.8.6 A Influência da Variação da Corrente e da Composição do Gás de Proteção no Processo de Soldagem TIG

O processo de soldagem TIG utilizando como gás de proteção misturas argônio-hidrogênio proporciona eficiência de fusão mais elevada do que para o caso do argônio puro, podendo ser mais elevada do que o hélio dependendo do teor de hidrogênio. Este aumento da eficiência de fusão pode ser atribuído principalmente à maior condutividade térmica do hidrogênio (SCHWEDERSKY *et al.*, 2011).

Uma alternativa importante para aumentar a velocidade de soldagem no processo TIG é a utilização de misturas do argônio com hidrogênio como gás de proteção. Verificou-se que a

utilização destas misturas diminuiu bastante a tendência de formação dos defeitos de soldagem denominado *humping*. Esse tipo de descontinuidade do cordão de solda ocorre quando se utilizam altas correntes e velocidades de soldagem (MENDEZ, 1999; SODERSTROM, 2006). O *humping* ocorre porque há um desbalanceamento entre as pressões hidrostáticas, pressões do arco elétrico e as pressões capilares. Esse desbalanceamento faz com que parte da poça de soldagem saia do local ideal e vá para um local não desejado (BARROS, 2018).

Quando comparado com o argônio puro e este processo de soldagem TIG na maioria das aplicações tradicionais, utiliza-se o gás de proteção argônio puro, deste modo, uma maneira de obter melhoria de produtividade em aplicações mecanizadas e automatizadas que permitem maiores velocidades de soldagem é a partir da utilização de frações de H₂ no gás de proteção da solda (SCHWEDERSKY *et al.*, 2011).

De acordo com os pesquisadores que observaram os defeitos de soldas pelo processo TIG em aplicações de elevada velocidade consideram a pressão do arco fundamental para ocorrência de descontinuidades (KUMAR, 2006; SODERSTROM, 2006). Entretanto, em experimentos feitos por Schwedersky *et al.* (2011) foi possível mostrar indícios de que o mecanismo de formação de descontinuidades além de depender da pressão do arco, depende também da quantidade de metal fundido, além de ser dependente da eficiência de fusão proporcionada pelo gás utilizado.

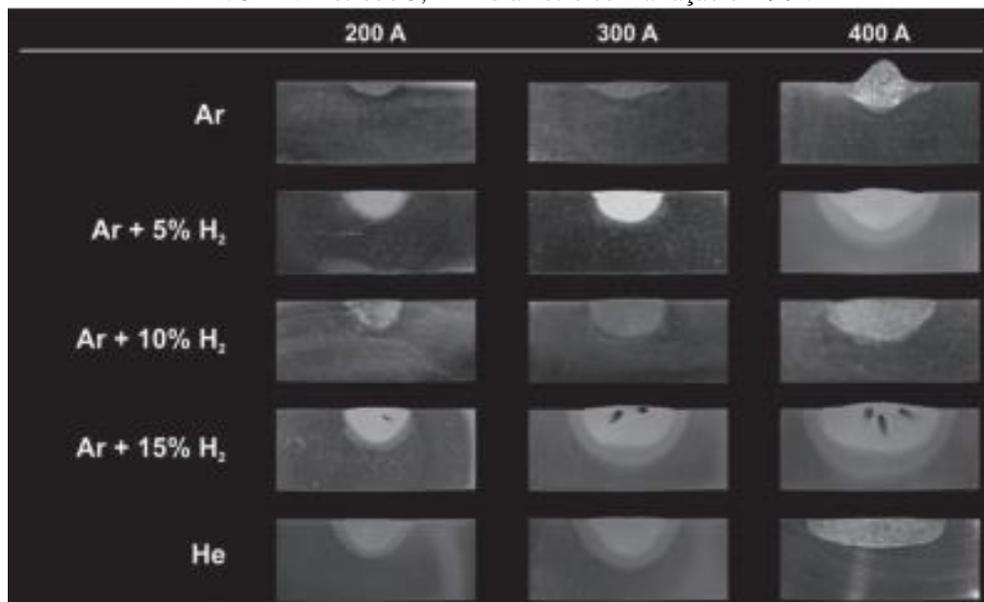
Conforme os experimentos realizados por Schwedersky *et al.* (2011) fizeram ensaios com diferentes correntes utilizando argônio, hélio e misturas argônio-hidrogênio como gás de proteção. Os resultados mostraram que para a mesma corrente média, com o aumento do teor de H₂, obteve também aumentos da área fundida e eficiência de fusão.

Segundo Schwedersky *et al.* (2011) o gás de proteção argônio puro obteve o cordão contínuo somente na corrente de 200A, já para a corrente de 300A ocorreu formação de defeitos em cerca de metade do cordão, e com 400A de corrente ocorreu formação de defeitos em todo o cordão. Por outro lado, para o caso dos ensaios realizados com hélio não ocorreu a formação de descontinuidades em nenhuma das correntes testadas.

De acordo com Schwedersky *et al.* (2011) para o primeiro caso da combinação do Ar + 5% H₂ no cordão soldado com a corrente de 300A não apresentou a formação de descontinuidades do tipo *humping*. No ensaio com a corrente de 400A o metal líquido, proveniente da poça de fusão

conseguiu antes da solidificação completa, fazer o preenchimento da solda e formar o cordão de solda de maneira contínua. Os ensaios realizados com as combinações de Ar + 10% H₂ e Ar + 15% H₂ apresentaram cordões sem descontinuidades em todas as correntes testadas. Por outro lado, a combinação Ar + 15% H₂ ocorreu aparecimento de porosidade na superfície do cordão de solda. A Figura 3.21 apresenta as seções transversais cortadas a 150mm do início de cada cordão soldado.

Figura 3.21 Seção transversal dos cordões cortados a 150mm de distância do início da solda. Vs: 30cm/min. DEP: 3mm. Eletrodo 3,2mm diâmetro com afiação em 90°.



Fonte: Schwedersky *et al.* (2011).

A Figura 3.22 a) ilustra a quantidade de metal fundido em kg/h a partir da média da área da seção transversal de cada cordão. É possível verificar que para a mesma corrente média a fusão com o hélio obteve uma quantidade maior de material em comparação com o argônio puro. Nas misturas Ar-H₂, conforme o aumento do teor de hidrogênio, aumentou-se a quantidade de metal fundido para a mesma corrente média. Para a mistura com maior teor de H₂ a quantidade de metal fundido foi consideravelmente maior do que utilizando He puro, e cerca de 2,5 vezes maior do que utilizando Ar puro. A Figura 3.23 b ilustra a tensão média para os diferentes gases testados com correntes de 200A, 300A e 400A. Conforme já era esperado devido à diferença na energia de ionização dos dois gases, o arco com He apresentou tensão consideravelmente maior do que o arco com Ar para mesma distância eletrodo-peça e mesma corrente média. Essa diferença foi superior a 4V em todas as correntes testadas. Os ensaios com as misturas Ar-H₂

confirmaram a mesma tendência apresentada nos trabalhos de Hooijmans (1994) e de Tusek e Suban (2000), sendo que a tensão do arco foi maior conforme o aumento do teor de H_2 presente no gás de proteção. A tensão do arco da mistura Ar+15% H_2 apresentou valores próximos a tensão do arco com He puro considerando o mesmo comprimento do arco elétrico e corrente elétrica.

Figura 3.22 a) - Quantidade de metal fundido para os diferentes gases.

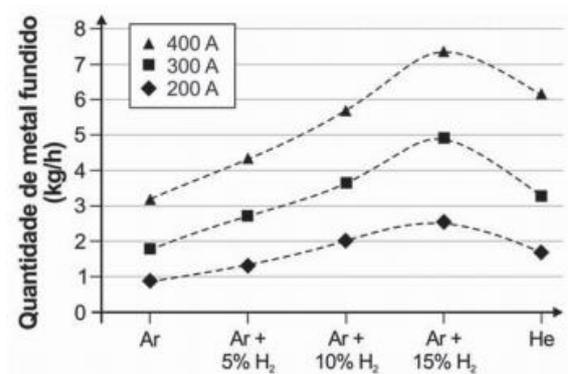
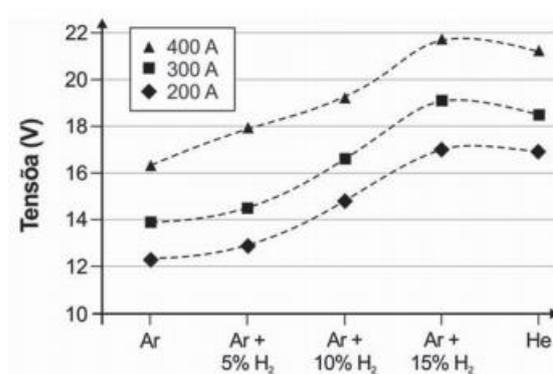


Figura 3.22 b) - Tensão e corrente do arco para os diferentes gases.



Fonte: Schwedersky *et al.* (2011)

Segundo Schwedersky *et al.* (2011) os experimentos no LABSOLDA, indicaram que foram obtidas soldas de alta qualidade com o processo TIG atingindo velocidades de soldagem de 1,5m/min., este procedimento utilizado na proteção misturas Ar-H₂, possibilitou velocidade semelhante ao processo MIG/MAG convencional, com a vantagem de ser realizada sem material de adição.

A utilização de misturas Ar-H₂ com teor de 15% de hidrogênio foi o que possibilitou obtenção da velocidade de soldagem alta sem o aparecimento de defeitos do tipo *humping* no cordão durante o processo da soldagem (SCHWEDERSKY *et al.*, 2011).

Por outro lado, estudos e experimentos feitos, por Oliveira *et al.* (2012) sobre a influência da variação da corrente de soldagem TIG Autógena, com o objetivo do trabalho de caracterizar quais fatores entre gás de proteção e corrente de soldagem, influenciaram a zona de fusão das juntas soldadas de um aço superduplex em relação à fração volumétrica das fases ferrita e austenita geradas. Foram obtidas imagens das regiões soldadas, principalmente da ZF (Zona Fundida) a partir de um microscópio óptico *Axiolmager M1m Zeiss*, com captura digital de

imagem através de uma câmara digital acoplada. Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise estatística fatorial ANOVA (*Analysis Of Variance*) envolvendo dois fatores, a variação da composição do gás de proteção e a variação da corrente. Seguem os dados da Tabela 3.3.

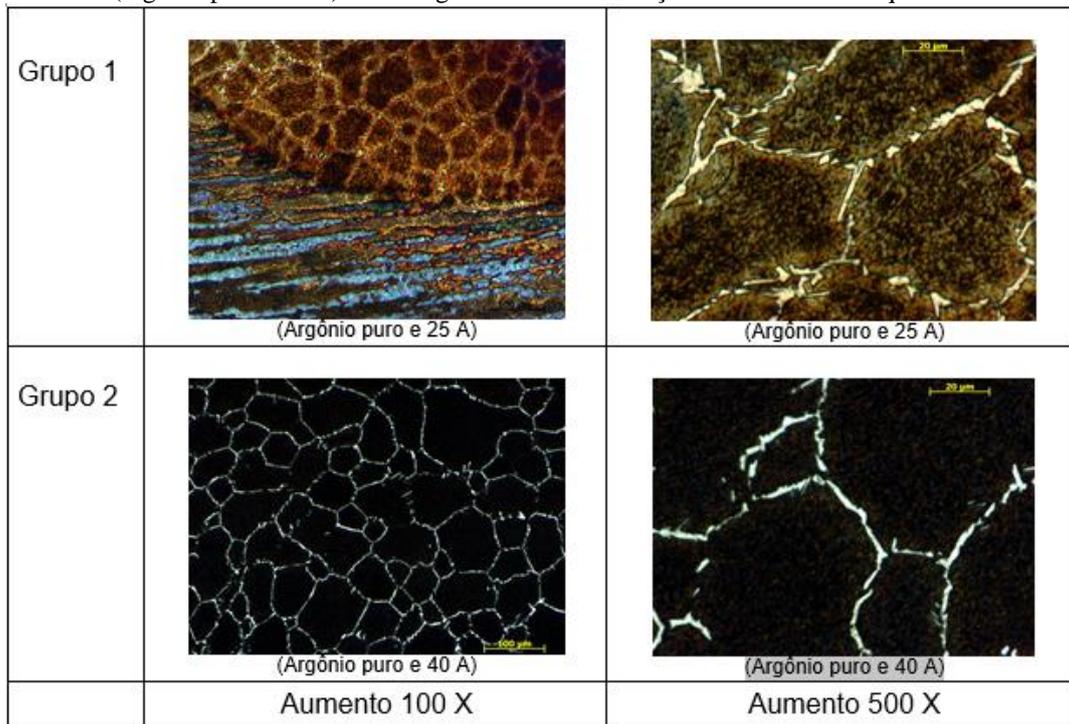
Tabela 3.3 – Grupos de amostras com os parâmetros do gás de proteção e da corrente do processo de soldagem TIG do aço UNS S32760.

Grupo	Gás de proteção	Corrente (A)
1	Argônio puro	25
2		40
3	Argônio + 2,5% nitrogênio	25
4		40

Fonte: Oliveira *et al.* (2012).

Segundo Oliveira *et al.* (2012) foi utilizada a técnica de processamento digital de imagens para a quantificação das frações volumétricas das fases presentes e os resultados obtidos tratados por ferramenta estatística ANOVA mostraram que a variação da composição química do gás de proteção foi o fator que influenciou na quantidade de austenita e conseqüentemente de ferrita nas juntas soldadas por processo TIG autógeno. Destaca-se a presença de carbonitreto no interior da Ferrita (fase escura) e Austenita (fase clara) conforme representado na Figura 3.23.

Figura 3.23 – Aspectos micrográficos das juntas soldadas das amostras dos grupos 1 (argônio puro e 25A) e 2 (argônio puro e 40A) da soldagem TIG na ZF do aço UNS S32760. Ataque BEHARA.

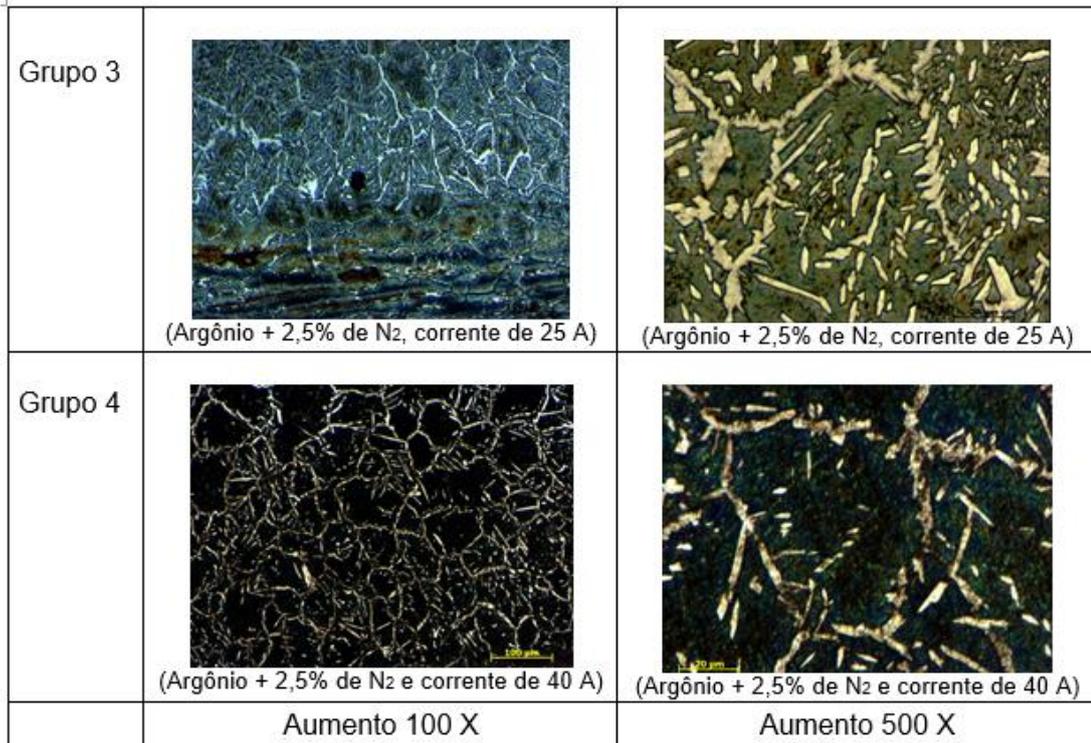


Fonte:

Oliveira *et al.* (2012).

Conforme apresentado na Figura 3.24 as amostras soldadas com 40A apresentaram grãos da fase ferrita com dimensões maiores em relação às amostras soldadas com 25A devido ao maior aporte de calor utilizado.

Figura 3.24-Aspectos micrográficos das juntas soldadas das amostras dos grupos 3 (argônio + 2,5% de N₂ e 25A) e 4 (argônio + 2,5% de N₂ e 40A) da soldagem TIG na ZF do aço UNS S32760. Ataque BEHARA.



Fonte: Oliveira *et al.* (2012).

De acordo com Oliveira *et al.* (2012) o método estatístico utilizado ANOVA mostrou que a variação da corrente de soldagem de 25A para 40A não interferiu significativamente na quantidade de austenita e ferrita, e a interação entre os efeitos causados pelo gás de proteção e a corrente de soldagem não afetaram a quantidade de austenita nas ZF e o que realmente interferiu na variação da fração volumétrica dessa fase foi a variação do gás de proteção. Segundo Oliveira *et al.* (2012) a adição de 2,5% de N₂ quadruplicou a percentagem de austenita presente na ZF da junta soldada, em relação ao grupo que utilizou somente o argônio puro como gás de proteção.

No entanto, a adição de 2,5% de nitrogênio ao gás de proteção obteve estabilização da fase da austenita, conforme citado por vários pesquisadores e confirmado pelo resultado do experimento de Oliveira *et al.* (2012).

Portanto, os desbalanceamentos de fases podem ocorrer tanto na ZF quanto na ZTA desses aços, junto com a composição química, afetam a microestrutura do material, e consequentemente influenciam nas propriedades desses materiais como resistência mecânica e resistência à corrosão.

4. CONCLUSÕES

O alto número de variáveis envolvidas e a relação entre elas para estabelecimento das condições mais adequadas de soldagem para uma dada aplicação pode existir diferentes soluções.

No processo de soldagem SMAW de acordo com a pesquisa do experimento apresentada neste trabalho, a variação da corrente e a composição química do eletrodo têm influência considerável na geometria do cordão de solda. Entretanto, nas condições propostas, indicam que a diferença existente na composição química dos eletrodos testados não influenciou na geometria do cordão de solda do aço inoxidável superduplex considerado. A corrente de soldagem utilizada afeta a morfologia do cordão de solda. Entretanto, esta corrente não altera a fração volumétrica das fases presentes. Alteração que poderia influenciar nas propriedades mecânicas e consequentemente afetar o desempenho do material.

No processo de soldagem MIG/MAG confirmou-se que há uma maior taxa de fusão em polaridade direta, mas os resultados indicam que esta se deva mais à subida do arco pelas paredes da ponta do arame em procura por óxidos, para emissão por campo, aumentando a eficiência térmica, do que por um maior calor gerado na conexão catódica. É possível se obter cordões de boa aparência superficial na condição de polaridade direta, em uma condição de corrente alta, e utilizando um gás de proteção com algum teor oxidante, no caso de 2% O₂ de acordo com o experimento feito com o aço carbono SAE 1020 mencionado na pesquisa deste trabalho.

Para o processo TIG com corrente alternada, um aumento na penetração e nas áreas de fusão do material alumínio 1200 foi verificado à medida que foram utilizados maiores tempos de polaridade positiva. Este comportamento difere daquele predominante, indicado de maneira geral pela literatura sobre processos de soldagem com eletrodos não consumíveis, que infere uma diminuição na penetração com o aumento do tempo de atuação da polaridade positiva.

Experimentos desta pesquisa de trabalho mostraram que a variação da composição química do gás de proteção foi o fator que efetivamente influenciou na quantidade de austenita nas juntas soldadas do aço inoxidável superduplex analisado.

Os processos da metalurgia de soldagem dos metais devem ser pesquisados e analisados de acordo com as configurações elétricas e parâmetros geométricos estabelecidos com base nas transformações de fase que ocorrem, tanto na ZF, como na ZTA, pois essas transformações podem afetar a microestrutura do material.

Portanto, é possível aliar as vantagens de cada processo e suas limitações, a fim de obter uma melhoria, tanto em termos de produtividade e qualidade, quanto em desempenho dos três processos de soldagem pesquisados.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. F. C. **Influência da corrente de pulso, do tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

ASM - American Society for Metal Handbook. **Welding Fundamental and Process**. Vol 06A. USA: ASM International, 981p. 2011.

_____. **Welding Brazing and Soldering**. ASM, Vol. 6, 1993.

ASSUNÇÃO, P.D.; **Estudo da viabilidade do processo de soldagem GMAW-DCW (DOUBLE COLD WIRE)** [dissertação de mestrado]. Pará: Universidade Federal do Pará, 2013.

AWS - American Welding Society. **Welding Handbook - Welding Processes**, vol.2; USA, 955p.1991.

_____. **Welding Science and Technology**. 9ª Edição. AWS, v.1, 2001.

BARROS, M. B. R. **Detecção do Defeito Humping no Processo TIG por Meio de Monitoramento Termográfico da Poça de Fusão**. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação 2018, Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, no.p. 102.2018.

BELMONTE Jr., M. L.; PIMENTA, J. M. P.; PEREIRA, L. O.; GONÇALVES, E. A.S.; FERREIRA, D. S. R.; FREITAS, R. P.; DINIZ, M.G.; PIMENTA, A. R. **Influência do metal de adição e corrente de soldagem SMAW na microestrutura de aços inoxidáveis duplex**. ENGEVISTA, Rio de Janeiro, p.104-113, v.21 fevereiro 2019.

BRACARENSE, A.Q. **Processo Soldagem TIG - GTAW**. UFMG. Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2000.

CIRINO, L. M.; DUTRA, J. C. **A Influência do Tempo de Atuação da Polaridade Positiva na Soldagem TIG CA do Alumínio**, 2009.

CIRINO, L. M. **Estudo dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos processos TIG e MIG/MAG**. Florianópolis: [s.n.], 2009.

DUTRA, J. C.; GONÇALVES e SILVA, R. H.; SAVI, B. M.; MARQUES, C.; ALARCON, O. E. **“New methodology for AC-pulsed GMAW parametrization applied to aluminum shipbuilding”**, The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015.

FARIAS, J. P. e DUTRA, J. C. **Efeito do Tipo de Fonte de Energia Sobre a Estabilidade do Arco de Eletrodos Revestidos**, XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1993.

GERKEN, J.M. **Gas Tungsten Arc Welding**. James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 42 p., 1991.

GOHR Jr., R. **Novos Métodos de Controle de Soldagem MIG/MAG**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

HANDBOOK, Welding. **Welding Science & Technology**, American Welding Society, 2001.

HOOIJMANS, J. **Hydrogen Absorption in Iron and Steel During Gas Tungsten Arc Welding**. thesis. ed. the Netherlands: Delft Univ. Technol. 1994.

JÖNSSON, P.G.; EAGAR, T.W. & SZEKELY, J. (1995), **Heat and Metal Transfer in Gas Metal Arc welding Using Argon and Helium**, Metallurgical and Materials Transactions B, v 26B, pp. 383-395, Apr 1995.

JOSEPH, A.; WEBB, C.; HARAMIA, M.; YAPP, D. **“Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet”**, 56th IIW International Conference, Bucharest, July/2003.

KEN-HICKEN, G. **Gas Tungsten Arc Welding** - ASM Handbook – Welding Brazing and Soldering Vol. 6, p. 597-602, 1993.

KIM, T. J.; LEE, J. P.; MIN, B. D.; Yoo, D. W.; KIM, C. U. **Characteristics of Pulse MIG Arc Welding with a Wire Melting Rate Change by Current Polarity Effect**, Journal of Electrical Engineering and Technology, v. 2 (3), p. 366-372, 2007.

KUMAR, A.; DEBROY, T. **Toward a Unified Model to Prevent Humping Defects in Gas Tungsten Arc Welding**. Welding Journal, p. 292-304, December 2006.

LANCASTER, J. F., **The physics of welding**. 2nd ed., New York: (Oxford: Pergamon). 1986.

MACHADO, I. G., **“Soldagem & técnicas conesas: processos”**, Centro de tecnologia Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, 1996.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BACARENSE, A.Q. **Soldagem I: Introdução aos Processos de Soldagem**. 3.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000.

_____. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362p.

_____. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 362p.

_____. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3.ed. atual. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MATHERS, G. **The Welding of Aluminium and its Alloys**. 1. ed. Cambridge: CRC Press. 233 p, 2002.

MENDEZ, P. F. **Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding**. Massachusetts Institute of Technology. 1999.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. São Paulo: Editora Blucher, 2006.

MODENESI, P. J. **Fluxo de calor em soldagem**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, 2003.

_____. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 37p.

_____. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais.** Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. Belo Horizonte, 2012. 141p.

NASCIMENTO, A. S.; VILARINHO, L. O. “**Uma contribuição ao estudo da soldagem MIG-CA**”, 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.

OLIVEIRA, A. A.; DINIZ, M. G.; PIMENTA, A. R. **Influência da variação da corrente de soldagem TIG autógena e da composição do gás de proteção na zona de fusão do aço UNS S32760.** LaCam-Laboratório de Caracterização de Materiais – UERJ, Rio de Janeiro, 2012.

PARK, H. J.; RHEE, S.; KANG, M. J.; KIM, D. C. “**Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding**”, Materials Transactions, v. 50 (9), p. 2314-2317. 2009.

QUITES, A.M., DUTRA, J.C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico.** Florianópolis, Edene, p. 174-86. 1979.

SANTOS, M.G. - **Metodologia para Comparação entre Fonte Inversora e Eletromagnética para Eletrodos Revestidos.** Dissertação de Mestrado, UFU, 1995.

SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. **Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding.** *Welding Journal*, 212s-224. Jul, 1979.

SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C.; OKUYAMA, M. P.; GONÇALVES e SILVA, R. H. **Soldagem TIG de Elevada Produtividade. Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação do Defeitos.** São Paulo, p.333-340. Dezembro, 2011.

SCOTTI, A., **A review on special metal transfer modes in GMAW.** *Rev. Bras. de Ciências Mecânicas* - RBCM, ABCM, vol XX, no. 3, p. 465-478. Set, 1998.

SODERSTROM, E.; MENDEZ, P. F. **Humping mechanisms present in high speed welding.** *Science and Technology of Welding and Joining*, p. 572-579. 2006.

SOUZA, D.; RERENDE, A. A.; SCOTTI, A. **Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG**. Soldagem Insp. Uberlândia/MG, p 192-198. Maio, 2009.

TALKINGTON, B. S., **Variable polarity gas metal arc welding**. Dissertação de Mestrado, The Ohio State University, 1998.

TEIXEIRA, G. S. **Análise da Influência dos Parâmetros de Soldagem sobre a Geometria do Cordão de Solda Depositado pelo Processo de Soldagem TIG-MAG em Tandem**, (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TONG, H.; UEYAMA, T.; HARADA, S.; USHIO, M. **Quality and Productivity in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using Alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 6, n. 4, 2001.

TUSEK, J.; SUBAN, M. **Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high alloy stainless steel**. International Journal of Hydrogen Energy, n. 25, p. 369-376, 2000.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 4a reimpressão, 2004. p.492.

WGRZYN J. - **Arc Properties in Manual Welding with Coated Electrodes**. Metal Construction, July 1980.

YARMUCH, M.A.R.; PATCHETT, B.M. **Variable AC Polarity GTAW Fusion Behaviour in 5083 Aluminum**. Welding Journal, v. 86, n. 02, p. 196s-200s. Jul, 2007.