

EFEITO DA ADIÇÃO DE 0,6% DE  $C_3H_6$  NO GÁS  $Ar+25\%CO_2$  E DE 1,3% DE  $C_3H_6$  NO GÁS  $CO_2$  NA ESTABILIDADE DO PROCESSO GMAW COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

**ANDERSON FLORES POLONINE**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY  
RIBEIRO– UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
SETEMBRO - 2018

EFEITO DA ADIÇÃO DE 0,6% DE  $C_3H_6$  NO GÁS  $Ar+25\%CO_2$  E DE 1,3% DE  $C_3H_6$  NO GÁS  $CO_2$  NA ESTABILIDADE DO PROCESSO GMAW COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

**ANDERSON FLORES POLONINE**

Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
SETEMBRO DE 2018

EFEITO DA ADIÇÃO DE 0,6% DE  $C_3H_6$  NO GÁS  $Ar+25\%CO_2$  E DE 1,3% DE  $C_3H_6$  NO GÁS  $CO_2$  NA ESTABILIDADE DO PROCESSO GMAW COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

**ANDERSON FLORES POLONINE**

Dissertação de Mestrado submetido ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovado em 03/09/2018.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova (Dra. Ciência de Materiais Metálicos e Tratamentos Térmicos) – UENF

---

Prof<sup>a</sup>. Elaine Cristina Pereira (DSc. Engenharia e Ciência dos Materiais) – UENF

---

Prof<sup>a</sup>. Angélica da Cunha dos Santos (Dra. Engenharia e Ciência dos Materiais) – IFF

---

Prof. Ronaldo P. R Paranhos (PhD. Tecnologia da Soldagem) – UENF (Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

Esta fase da minha vida é muito especial e não posso deixar de agradecer a Deus por toda força, ânimo e coragem que me ofereceu para ter alcançado minha meta.

Aos meus pais Hernani Gonçalves da Silva e Margarida Correa Flores porque foram eles que me incentivaram e inspiraram a superar todas as dificuldades.

A minha querida esposa Franciane Jordão Machado que com sabedoria se aloja no meu coração, você, obrigado por tanto amor, pela boa convivência e compreensão ao longo de nossa vida;

Aos meus filhos Julia Jordão Flores e Guilherme Jordão Flores, que são tudo para mim;

Ao meu orientador Prof. PhD. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos por sua paciência, dedicação, confiança e orientação;

À Universidade e aos professores quero deixar uma palavra de gratidão por ter me recebido de braços abertos, porque foram eles que me deram recursos e ferramentas para evoluir um pouco mais todos os dias;

Dedico aos meus irmãos que me incentivaram tanto neste trabalho;

Ao amigo e técnico do laboratório do LAMAV Silvio Gonçalves Mendes por compartilhar sua experiência no uso dos equipamentos da oficina metalográfica;

Aos colaboradores da Fundação de Apoio à Escola Técnica (FAETEC), em especial ao prof. Jossandro por sua grande contribuição nos experimentos práticos de soldagem;

A quem não mencionei, mas estive junto eu prometo reconhecer essa proximidade, ajuda e incentivo todos os dias da minha vida;

Por fim, aos amigos professores do IFES Campus-Cachoeiro de Itapemirim que sempre me apoiaram nesta pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xiii</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3 JUSTIFICATIVA.....	3
<b>CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM GMAW.....	5
<b>2.1.1 Descrição do Processo .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2 Atmosfera Protetora .....</b>	<b>7</b>
2.1.2.1 Potencial de Ionização.....	7
2.1.2.2 Condutividade Térmica.....	9
2.1.2.3 Potencial de Oxidação.....	10
<b>2.1.3 O Arco Voltaico .....</b>	<b>11</b>
2.1.3.1 Caracterização do Arco Voltaico Aplicado à Soldagem e suas Regiões .....	12
2.1.3.2 Coluna de Plasma .....	14
<b>2.1.4 Formação da Escória.....</b>	<b>15</b>
2.2 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO GMAW .....	16
2.2.1.1 Classificação dos Modos de Transferência Metálica.....	18
<b>2.2.2 Modos Naturais de transferência Metálica .....</b>	<b>19</b>
2.2.2.1 Transferência metálica por curto-circuito.....	20
2.2.2.2 Transferência Globular .....	22
<b>2.2.3 Transferência Goticular ou Spray ou Aerosol.....</b>	<b>23</b>
2.3 GASES DE PROTEÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW .....	25
<b>2.3.1 Principais Gases de Proteção Utilizados.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2 Mistura de Gases de Proteção .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.3 O Propileno.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.4 Adição de Propileno em Gases de Proteção.....</b>	<b>34</b>
2.4 ESTABILIDADE DO PROCESSO PARA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO.....	35

<b>2.4.1 Parâmetros Importantes Analisados para Estabilidade do Processo</b> .....	<b>36</b>
2.4.1.1 Sinais do Arco Elétrico.....	37
2.4.1.1.1 Análise estatístico dos sinais.....	40
<b>2.4.2 Índice Vilarinho (IVcc)</b> .....	<b>41</b>
<b>2.4.3 Geração de Respingos</b> .....	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO 3: Materiais e Métodos</b> .....	<b>43</b>
3.1 MATERIAIS .....	43
<b>3.1.1 Metal de base (chapas de teste)</b> .....	<b>43</b>
<b>3.1.2 Metal de adição</b> .....	<b>43</b>
<b>3.1.3 Gases de Proteção</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1.4 Materiais para Preparação Metalográfica</b> .....	<b>44</b>
3.2 EQUIPAMENTOS.....	44
<b>3.2.1 Equipamentos e ferramentas auxiliares</b> .....	<b>45</b>
3.3 METODOLOGIA .....	46
<b>3.3.1 Etapa I</b> .....	<b>46</b>
3.3.1.1 Preparação das chapas de teste .....	46
3.3.1.2 Soldagem.....	47
3.3.1.3 Inspeção qualitativa.....	47
3.3.1.4 Aquisição e avaliação dos sinais elétricos para análise da estabilidade do arco .....	48
<b>3.3.2 Etapa II</b> .....	<b>48</b>
3.3.2.1 Soldagem.....	49
3.3.2.2 Elaboração e confecção do coletor de respingos .....	49
3.3.2.3 Inspeção visual e líquido penetrante.....	50
3.3.2.4 Aquisição e avaliação dos sinais elétricos para análise da estabilidade do arco .....	50
3.3.2.5 Característica da geometria do cordão de solda.....	50
3.3.2.6 Avaliação da quantidade de escória e respingos produzidos nas soldas .....	51
3.3.2.7 Taxa de deposição .....	52
<b>3.3.3 Etapa III</b> .....	<b>52</b>
3.3.3.1 Análise da microestrutura no metal de solda .....	52
3.3.3.2 Dureza Vickers.....	53
<b>CAPÍTULO 4: Resultados e discussão</b> .....	<b>54</b>
4.1 Etapa I.....	54
<b>4.1.1 Soldagem</b> .....	<b>54</b>

4.1.2 Avaliação Qualitativa.....	55
4.1.3 Avaliação dos sinais elétricos para análise da estabilidade do arco elétrico	58
4.1.4 Considerações finais.....	63
4.2 Etapa II.....	64
4.2.1 Elaboração e confecção do coletor de respingos .....	64
4.2.2 Soldagem .....	65
4.2.3 Inspeção visual e LP.....	66
4.2.4 Avaliação dos sinais elétricos para análise da estabilidade do arco .....	67
4.2.5 Geometria do cordão de solda.....	71
4.2.6 Avaliação da quantidade de escória e respingos produzidos nas soldas .....	74
4.2.7 Taxa de deposição.....	76
4.2.8 Considerações finais.....	78
4.3 Etapa III.....	78
4.3.1 Análise da microestrutura no metal de solda .....	78
4.3.2 Dureza Vickers .....	80
4.3.3 Considerações Finais.....	81
<b>CAPÍTULO 5: Conclusão.....</b>	<b>82</b>
<b>CAPÍTULO 6: Sugestões .....</b>	<b>83</b>
<b>CAPÍTULO 7: Referência Bibliográfica .....</b>	<b>84</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processo de soldagem GMAW (AWS, 1991).....	5
Figura 2.2: Componentes de um sistema de soldagem semiautomática para aplicação GMAW (adaptado de ESAB, 2014).....	6
Figura 2.3: Esquema de montagem do equipamento para soldagem pelo processo GMAW (adaptado de ESAB, 2014).....	7
Figura 2.4: Condutividade Térmica de alguns gases em função da temperatura (Suban e Tusek, 2001). .....	10
Figura 2.5: Tipo de transferência metálica e perfil de penetração em função da condutividade térmica do gás de proteção: (a) hélio; (b) argônio (Vaidya, 2002). .....	10
Figura 2.6: Representação esquemática da queda de tensão ao longo de um arco. $V_{CAT}$ - zona de queda catódica; $V_{COL}$ - coluna do arco e $V_{AN}$ - zona de queda anódica (adaptado de Balmer, 2009).....	13
Figura 2.7: Representação esquemática do mecanismo de emissão catódica – (a) formação de camada de óxidos com carga positiva e agrupamento dos elétrons; (b) quebra localizada da camada de óxidos e emissão dos elétrons (adaptado de Modenesi, 2012). .....	14
Figura 2.8: Representação esquemática da perda térmica ao longo da coluna de plasma, devido a troca de calor com o meio externo (Scotti e Ponomarev, 2014).....	15
Figura 2.9: Cordões de solda feitos pelo processo MIG/MAG com combinação arame / gás de proteção que produz escória (a) e com combinação arame / gás de proteção que não produz escória (b) (Scotti e Ponomarev, 2014).....	16
Figura 2.10: Forças governantes na gota pelo processo de soldagem GMAW, em que $F_v$ representa a força devido a tensão superficial, $F_g$ à gravidade, $F_{em}$ ao efeito eletromagnético, $F_a$ ao arraste pelo fluido e $F_v$ à vaporização (Barra, 2003).....	17
Figura 2.11: Ilustração do fenômeno de instabilidade da coluna de metal líquido conforme a Teoria da Instabilidade de Pinch (Scotti e Ponomarev, 2008). .....	18
Figura 2.12: Classificação dos modos de transferência metálica conforme a ordem hierárquica (classes, grupos e modos) (Scotti e Ponomarev, 2014). .....	18
Figura 2.13: Esquema de tensão x corrente para demonstrar as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (Modenesi e Bracarense, 2007).....	20
Figura 2.14: Representação esquemática da transferência por curto circuito (FBTS, 2015). .....	20
Figura 2.15: Representação esquemática da geração de respingos no destacamento da gota utilizando transferência por curto-circuito (DeRuntz, 2003).....	21

Figura 2.16: Oscilogramas da transferência por curto-circuito para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O <sub>2</sub> (Modenesi e Bracarense, 2009). .....	21
Figura 2.17: Representação esquemática de transferência globular. Nela pode-se observar a formação da gota (A) e o seu desprendimento para a formação da poça de fusão (B) (adaptado FBTS, 2015). .....	23
Figura 2.18: Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência globular em 250 ms (a) e 1,5 s (b). Arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção CO <sub>2</sub> (Modenesi, 2004). .....	23
Figura 2.19: Representação esquemática de transferência spray (projetada) (FBTS, 2015). .....	24
Figura 2.20: Oscilogramas de um processo com transferência spray. Arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O <sub>2</sub> (Modenesi e Bracarense, 2009). .....	25
Figura 2.21: Influência da configuração da junta na regulagem da vazão do gás de proteção (Ponomarev e Scotti, 2008). .....	26
Figura 2.22: Aspectos das gotas e o padrão de penetração para diferentes gases de proteção (FBTS, 2015). .....	27
Figura 2.23: Os efeitos da adição de oxigênio e de CO <sub>2</sub> ao argônio e o CO <sub>2</sub> puro (Lincoln Electric Company, 2015 apud Menezes, 2016). .....	30
Figura 2.24: Entalpia dos gases em função da temperatura (Tusek e Suban, 2000). .....	30
Figura 2.25: Condutividade térmica dos gases em função da temperatura (Tusek e Suban, 2000). .....	31
Figura 2.26: Painel de conexões do sistema SAP V4 (a); SAP V4 acoplado a máquina de solda (b) (Ribeiro, 2016). .....	37
Figura 2.27: Tela de monitoramento instantâneo dos parâmetros de soldagem (IMC Soldagem, 2014). .....	38
Figura 2.28: Oscilograma de corrente (A) vs tempo (s) na soldagem por curto-circuito (IMC Soldagem, 2014). .....	38
Figura 2.29: Oscilograma de tensão (V) vs tempo (s) na soldagem por curto-circuito (IMC Soldagem, 2014). .....	39
Figura 2.30: Resultados da análise estatística obtidos pelo sistema SAP V4 (IMC Soldagem, 2014). .....	41
Figura 3.1: Fonte de soldagem GMAW da marca ESAB modelo Smashweld 316. ....	44
Figura 3.2: a) Trator de soldagem com a tocha acoplada. b) Unidade de controle PEJ para o controle da velocidade de soldagem. ....	45
Figura 3.3: Sistema de aquisição de dados (IMC Soldagem, 2014). .....	45

Figura 3.4: Equipamento SAP V4 acoplado a fonte de energia. ....	48
Figura 3.5: Coletor de respingos (Ribeiro, 2016). ....	50
Figura 3.6: Parâmetros geométricos do cordão de solda (adaptado de Silva e Scotti, 2002). .....	51
Figura 3.7: Respingos e escórias retidos na chapa e no cordão de solda. ....	51
Figura 3.8: Localização dos pontos onde serão realizadas as medidas de dureza Vickers (adaptado Menezes, 2016). ....	53
Figura 4.1: Variação dos índices DPPC, DPAA e DPCC em função da tensão de soldagem para o gás Ar+25%CO <sub>2</sub> . ....	59
Figura 4.2: Variação dos índices DPPC, DPAA e DPCC em função da tensão de soldagem para o gás Ar+25%CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> . ....	60
Figura 4.3: Variação dos índices DPPC, DPAA e DPCC em função da tensão de soldagem para o gás CO <sub>2</sub> . ....	61
Figura 4.4: Variação dos índices DPPC, DPAA e DPCC em função da tensão de soldagem para o gás CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> . ....	62
Figura 4.5: a) coletor de respingos sem a tampa mostrando o posicionamento da chapa e da tocha; b) coletor com a tampa mostrando como foi o deslocamento da tocha. ....	64
Figura 4.6: Variação dos índices de estabilidade entre os gases de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> e Ar+25%CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> . ....	69
Figura 4.7: Variação dos índices de estabilidade entre os gases de proteção CO <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> . ....	70
Figura 4.8: Médias da largura, penetração, reforço e do IC para os quatro gases de proteção. ....	73
Figura 4.9: Variação da taxa de respingo e escória em função do gás de proteção. ....	75
Figura 4.10: Comparativo da taxa de deposição para os quatro gases de proteção. ....	77
Figura 4.11: Micrografias do metal de solda; (a) Ar+25%CO <sub>2</sub> ; (b) Ar+25%CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ; (c) CO <sub>2</sub> ; (d) CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> . Aumento de 500X. ....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Potencial de ionização de gases e vapores metálicos em elétron volts (eV).....	8
Tabela 2.2: Classes e respectivos modos natural de transferência metálica que acontecem no processo GMAW.....	19
Tabela 2.3: Faixas de corrente de transição típicas para aços-carbono e diferentes diâmetros de eletrodo e gases de proteção (lembrar que a faixa de corrente de transição depende de outros fatores operacionais, como a composição e comprimento livre reais de arame).....	24
Tabela 2.4: Propriedades dos gases de proteção (em comparação com o ar atmosférico)....	26
Tabela 2.5: Formulações de gás de proteção para soldagem a arco elétrico.....	31
Tabela 3.1: Faixa de composição química (% em peso) do aço carbono SAE 1020. ....	43
Tabela 3.2: Requisitos de composição química para arames de aços doces e de baixa liga. ....	43
Tabela 3.3: Nomenclatura dos gases de proteção e sua composição química. ....	44
Tabela 3.4: Parâmetros de soldagem fixos utilizados durante os ensaios. ....	47
Tabela 3.5: Valores médios de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame durante a soldagem. ....	49
Tabela 3.6: Microestruturas principais do metal de solda.....	53
Tabela 4.1: Soldas realizadas para os quatro gases variando a tensão em função da $V_{alim}$ de 5,0 m/min. ....	54
Tabela 4.2: Valores obtidos das soldas da primeira etapa para os quatro gases de proteção. ....	58
Tabela 4.3: Aspectos dos cordões de solda nas condições de pós limpeza.....	65
Tabela 4.4: Valores dos índices de estabilidade calculados para os quatro gases de proteção. ....	68
Tabela 4.5: Macrografias dos cordões de solda.....	71
Tabela 4.6: Valores da largura, reforço, penetração e do índice de convexidade (IC) dos cordões de solda para os quatro gases de proteção.....	72
Tabela 4.7: Estimativa da taxa de respingo e escória.....	74
Tabela 4.8: Quantidade de metal depositado e o tempo de soldagem para cada gás de proteção. ....	76
Tabela 4.9: Medida da dureza do metal de base (MB), da zona termicamente afetada (ZTA), zona fundida (ZF) e suas respectivas médias. ....	80

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

$\bar{x}$  – Média aritmética

A – Ampère

AF – Ferrita Acicular

AGA – do inglês The Linde Gas Group

Al – Alumínio

Ar – Argônio

Atm – Atmosférica

AWS – Sociedade Americana de Soldagem (do inglês American Welding Society)

C – Carbono

C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> – Propileno

CC+ – Corrente contínua de polaridade positiva

CI – Corrente constante

cm – Centímetro

Co – Cobalto

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

CT – Condutividade térmica

C<sub>v</sub> – Capacidade específica de calor a volume constante

CV – Tensão constante

d – Diagonal da impressão regular quadrática

D – Densidade

D.P. – Desvio padrão

D.R. – Desvio relativo

DBCP – Distância do bico de contato e a peça

D<sub>d</sub> – derivada de descida

DPAA – Desvio padrão do período de arco aberto

DPCC – Desvio padrão do período de curto circuito

DPCC – Desvio padrão de picos de corrente

D<sub>s</sub> – derivada de subida

ESAB – do sueco Elektriska Svetsnings AKtie Bolaget

EUA – Estados Unidos da América

eV – Eletronvolt

F – Força aplicada

$F_a$  – Força ao arraste químico  
FAETEC – Fundação de Apoio à Escola Técnica  
FBTS – Fundação Brasileira de tecnologia de Soldagem  
FC – Agregado Ferrita-Carbeto  
 $F_{cc}$  – fator de curto-circuito  
 $F_{cc}$  – Frequência de curto-circuito  
 $F_{em}$  – Força ao efeito magnético  
 $F_g$  – Força gravitacional  
FS(A) – Ferrita com Segunda Fase Alinhada  
FS(NA) – Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada  
 $F_v$  – Força à vaporização  
 $F_v$  – Força de tensão superficial  
g – grama  
GMAW – do inglês Gas Metal Arc Welding  
h – Hora  
 $H_2$  – Hidrogênio  
He – Hélio  
HV – Hardness Vickers  
Hz – Hertz  
I – Corrente  
IC – Índice de convexidade  
IE – Índice de estabilidade  
IIW – Instituto Internacional de Soldagem (do inglês Institute International Welding)  
IMC – Engenharia de Soldagem Instrumentação e Automação LTDA  
 $I_p$  – Picos de corrente  
IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada (do inglês International Union of Pure and Applied Chemistry)  
IVcc – Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito  
K – Kelvin  
 $K_{cc}$  – Fração de curto-circuito  
Kg – Quilograma  
 $K_v$  – Coeficiente ou taxa de variação  
L – Largura  
L – Litro

LP – Líquido penetrante  
M – Martensita  
m – metro  
mA – miliampère  
MAG – do inglês Metal Active Gás  
MIG – do inglês Metal Inert Gás  
min – minuto  
mm – Milímetro  
mm<sup>2</sup> – Área  
M<sub>n</sub> – Manganês  
ms – Milisegundo  
N – Newton  
N<sub>2</sub> – Nitrogênio  
Ni – Níquel  
O<sub>2</sub> – Oxigênio  
P – Fósforo  
P – Penetração  
P<sub>cc</sub> – Período de curto-circuito  
PF(G) – Ferrita de Contorno de Grão  
PF(I) – Ferrita Poligonal Intragranular  
PI – Potencial de ionização  
PO – Potencial de oxidação  
Q<sub>esc</sub> – Quantidade de escória  
Q<sub>res</sub> – Quantidade de respingo  
R – Fator de respingos  
r – Reforço  
S – Enxofre  
s – Segundo  
SAE – Sociedade de Engenheiros Automotivos (do inglês Society of Automotive Engineers)  
SAW – Soldagem a Arco Submerso (do inglês Submerged Arc Welding)  
Si – Silício  
SiO<sub>2</sub> – Óxido de silício  
SMAW – Soldagem com Eletrodo Revestido (do inglês Shielded Metal Arc Welding)

T – Tempo de transferência metálica  
T<sub>a</sub> ou T<sub>ab</sub> – Tempo de arco aberto  
T<sub>c</sub> ou T<sub>cc</sub> – tempo de curto-circuito  
t<sub>cc</sub> – Tempo de curto-circuito  
T<sub>d</sub> – Taxa de deposição  
T<sub>esc</sub> – Taxa de escória  
T<sub>i</sub> – Titânio  
T<sub>res</sub> – Taxa de respingo  
U – Tensão  
UENF – Universidade Estadual Norte Fluminense  
U<sub>p</sub> – Picos de tensão  
V – Volts  
V<sub>alim</sub> – Velocidade de alimentação de arame  
V<sub>AN</sub> – Zona de queda anódica  
V<sub>CAT</sub> – Zona de queda catódica  
V<sub>COL</sub> – Coluna do arco  
W – Watts  
σ – Desvio padrão  
σ<sub>tab</sub> – Desvio padrão da média do tempo de arco aberto  
σ<sub>tcc</sub> – Desvio padrão da média do tempo de curto-circuito

## Resumo

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da adição de 0,6% de  $C_3H_6$  no gás de proteção  $Ar+25\%CO_2$  e 1,3% de  $C_3H_6$  no gás de proteção  $CO_2$ , onde foi estudado a estabilidade do processo GMAW na soldagem do aço carbono utilizando transferência por curto-circuito. A metodologia foi dividida em três etapas: na primeira etapa foi determinado o valor da tensão de soldagem que proporcionasse uma adequada estabilidade do processo para cada um dos gases de proteção, por meio de avaliação qualitativa e índices da estabilidade do processo; na segunda etapa foi avaliado o efeito da adição de propileno na estabilidade do processo por meio da inspeção visual do cordão de solda, da avaliação de índices da estabilidade do processo, da geometria do cordão de solda, da taxa de respingo e escória e da taxa de deposição; na terceira etapa foi verificada a influência do  $C_3H_6$  na microestrutura e dureza do metal de solda. Os resultados mostraram a presença de faixas estáveis de trabalho para os quatro gases de proteção e que a adição do  $C_3H_6$  no gás  $Ar+25\%CO_2$  demandou maior tensão de soldagem. O propileno não influenciou no aspecto, acabamento e uniformidade do cordão de solda, não tendo sido detectadas descontinuidades superficiais e internas. A adição do  $C_3H_6$  aumentou a penetração para os dois gases convencionais estudados, aumentou a taxa de respingo e escória para o gás  $Ar+25\%CO_2$  e diminuiu estas taxas para o gás  $CO_2$ . A adição de  $C_3H_6$  aumentou a taxa de deposição para o gás  $CO_2$ , porém diminuiu para o gás convencional  $Ar+25\%CO_2$ . A microestrutura do metal de solda não sofreu alteração, devido a adição de propileno e os valores de dureza foram semelhantes para todos os gases. Por fim, foi concluído que a adição de  $C_3H_6$  proporcionou um ganho significativo na estabilidade do processo para o gás de proteção  $CO_2$ . Já para o gás  $Ar+25\%CO_2$  a adição de propileno não proporcionou melhora na estabilidade do processo.

Palavras-chave: GMAW, Curto-circuito, Propileno, Estabilidade, Gases de proteção.

## ABSTRACT

The present work aims to evaluate the effect of the addition of 0,6% of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> in the protection gas Ar+25%CO<sub>2</sub> and 1,3% of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> in the CO<sub>2</sub> protection gas, where the stability of the GMAW process in the welding of carbon steel using short circuit transfer. The methodology was divided into three stages: in the first step, the value of the welding voltage was determined, which provided an adequate process stability for each of the protection gases, through qualitative evaluation and process stability indexes; in the second stage, the effect of propylene addition on process stability was evaluated by visual inspection of the weld bead, evaluation of process stability indices, weld bead geometry, splash and slag rate and rate of deposition; in the third step the influence of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> on the microstructure and hardness of the weld metal was verified. The results showed the presence of stable working bands for the four protection gases and that the addition of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> in the Ar+25%CO<sub>2</sub> gas demanded a higher welding voltage. Propylene did not influence the appearance, finish and uniformity of the weld bead, and no surface and internal discontinuities were detected. The addition of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> increased the penetration for the two conventional gases studied, increased the rate of splash and slag for the gas Ar+25%CO<sub>2</sub> and decreased these rates for CO<sub>2</sub> gas. The addition of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> increased the deposition rate for CO<sub>2</sub> gas, but decreased for the conventional gas Ar+25%CO<sub>2</sub>. The microstructure of the weld metal did not change due to the addition of propylene and the hardness values were similar for all gases. Finally, it was concluded that addition of C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> provided a significant gain in process stability for the CO<sub>2</sub> protection gas. For the Ar+25%CO<sub>2</sub> gas, the addition of propylene did not improve the stability of the process.

Keywords: GMAW, Short Circuit, Propylene, Stability, Protective Gases.

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O processo GMAW (do inglês Gas Metal Arc Welding), também conhecido como processo de soldagem MIG/MAG (do inglês Metal Inert Gas / Metal Active Gas) é amplamente aplicado a indústria, principalmente por sua versatilidade, ao excelente nível de produtividade, confiança, facilidade de utilização e automatização. Porém, o processo oferece certa dificuldade associada à definição correta dos parâmetros de soldagem, principalmente devido ao número relativamente alto de variáveis e, sobretudo, a uma forte inter-relação entre estas (Santana e Modenesi, 2011).

Este processo GMAW necessita de gás de proteção, que influencia diretamente nos parâmetros operacionais do processo (Suban e Tusek, 2001). O gás de proteção é tido como protetor do conjunto arame/cordão de solda e é responsável por criar condições de abertura do arco elétrico. Desenvolver novas formulações de gases é de grande importância para o processo GMAW e abrange um campo para pesquisas, afim de proporcionar melhorias na aplicação deste processo de soldagem com maior economia e produtividade.

Embora muitos estudos tenham sido feitos para otimizar o processo GMAW, fenômenos envolvendo o arco elétrico, a solidificação do metal, as variáveis do processo, os modos de transferência metálica e os gases de proteção ainda possibilitam novas pesquisas (Modenesi et al., 2012).

Uma linha de desenvolvimento de novas misturas de gases que tendem a melhorar a proteção do cordão de solda e a estabilidade do arco para a soldagem de aços carbono tem seguido a direção de utilizar adição de gases redutores no processo GMAW, e poderá se tornar atraente no que diz respeito ao atendimento de uma área específica da indústria, podendo oferecer aumento de produtividade.

A utilização de gás combustível  $C_3H_6$  no processo GMAW é uma situação nova e foi proposto no trabalho de Ribeiro (2016). Em seu estudo o autor verificou proporções aceitáveis de propileno nos gases de proteção convencionais  $Ar+25\%CO_2$  e  $CO_2$ , de modo a avaliar os efeitos causados na estabilidade do processo GMAW.

Este trabalho tem o objetivo de estudar o efeito da adição do gás combustível propileno ( $C_3H_6$ ) em proporções adequadas, nos gases de proteção convencionais:

dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) puro e Argônio (Ar) + 25% $\text{CO}_2$ , para o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito para aço-carbono.

Neste trabalho o gás combustível  $\text{C}_3\text{H}_6$  foi escolhido dentre os gases combustíveis, por possuir boa relação H/C, e isto faz com que a cada molécula de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) que pode ser liberada durante o processo de soldagem possa atuar como redutor e ainda possibilite o fornecimento carbono (C) ao metal de solda (Rodrigues, 1994). Nos trabalhos de Rodrigues (1994) e Linnert (1994) a partir da quebra das ligações de C-C, C-H, e da recombinação destes átomos em altas temperaturas, tem-se a liberação de C e  $\text{H}_2$  e com isso, o  $\text{H}_2$ , atuaria como redutor no processo GMAW.

Segundo Tatagiba (2015), em quantidades específicas, a adição de hidrogênio no gás  $\text{CO}_2$  e na mistura Ar+25%  $\text{CO}_2$  indicam resultados satisfatórios na estabilidade do processo GMAW.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal é estudar o efeito da adição do gás combustível propileno em gases de proteção convencionais na soldagem do aço carbono utilizando o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito. Avaliando a estabilidade do processo, a aparência dos cordões de solda, sua geometria, a quantidade de escória e de respingos gerados, bem como a dureza e microestrutura do metal de solda.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adicionar 0,6% de propileno no gás de proteção Ar+25% $\text{CO}_2$  e 1,3% no gás de proteção  $\text{CO}_2$  e comparar os efeitos da adição de propileno, com os gases de proteção convencionais Ar+25% $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}_2$ ;
- Monitorar os sinais elétricos para avaliação quantitativa da estabilidade do arco elétrico;
- Realizar inspeção visual para detecção de descontinuidades superficiais e aspecto do cordão de solda;
- Medir a geometria dos cordões de solda para avaliar penetração e índice de convexidade;

- Elaborar um método mais eficaz para captação de respingos e determinar a influência da adição de propileno na taxa de geração de respingos e escória;
- Caracterizar as propriedades do metal depositado, por meio da microestrutura e dureza Vickers, com e sem a adição de propileno.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O processo GMAW apresenta alta produtividade e boa qualidade dos cordões de solda (repetibilidade). Desta forma atrai muitas pesquisas para seu desenvolvimento.

Os métodos de produção e os equipamentos industriais neste processo de soldagem se desenvolvem com o objetivo de conseguir alta produtividade. Fator este, muito importante diante de um mercado cada vez mais competitivo. O desenvolvimento de novas tecnologias neste processo, se alavancou nas últimas décadas com a evolução dos equipamentos e consumíveis de soldagem.

Apesar da grande influência do gás de proteção nas características do processo GMAW, seu nível de desenvolvimento não acompanhou a evolução dos equipamentos e consumíveis. Em seu trabalho, Tatagiba (2012) mostrou que foram feitas poucas pesquisas ou patentes registradas no desenvolvimento de novas formulações para gases de proteção.

Os gases de proteção amplamente utilizados neste processo são o argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que podem ser usados puros ou em misturas, com oxigênio (O<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) que podem ser adicionados em pequenas quantidades nos três primeiros gases citados. Observa-se uma grande tendência de usar misturas rica em gases inertes, com pequenas adições de elementos oxidantes.

O trabalho de Menezes (2016) em busca de novas formulações relata que a adição de 2% de H<sub>2</sub> no gás Ar+25%CO<sub>2</sub> não muda a estabilidade do processo, mas a adição de 4% de H<sub>2</sub> no gás de proteção CO<sub>2</sub> melhora significativamente a estabilidade do processo.

Ribeiro (2016) adicionou propileno, no processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito e confirmou que em proporções adequadas o processo é mais estável.

Os conhecimentos da influência do gás combustível propileno no processo GMAW, podem permitir a formulação de novas misturas gasosas, estabelecimento de novos padrões operacionais fazendo o processo ser mais produtivo e tornando-se viável para utilização na linha de produção.

Com o intuito de avaliar a estabilidade do processo, geração de escória e respingos serão utilizadas as misturas  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$  e  $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$  para que o hidrogênio possa se dissociar do carbono em altas temperaturas e reagir com os óxidos formados na região do arco elétrico. Com isso, evidenciar a influência do propileno sobre os cordões gerados no processo GMAW para aços carbono.

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM GMAW

#### 2.1.1 Descrição do Processo

O processo GMAW é uma técnica de união de materiais que se baseia na fonte de calor de um arco elétrico situado entre a ponta de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a ser soldada. A região da solda é protegida por uma atmosfera, podendo ser de gás inerte (comercialmente Ar e He), ativos (usualmente CO<sub>2</sub>) ou misturas destes (inclui-se como gás ativo, o O<sub>2</sub> e o N<sub>2</sub>) (Scotti & Ponomarev, 2014). A figura 2.1 ilustra esquematicamente o processo. Neste processo pode haver geração de escória como óxidos provenientes da reação do metal e os gases.

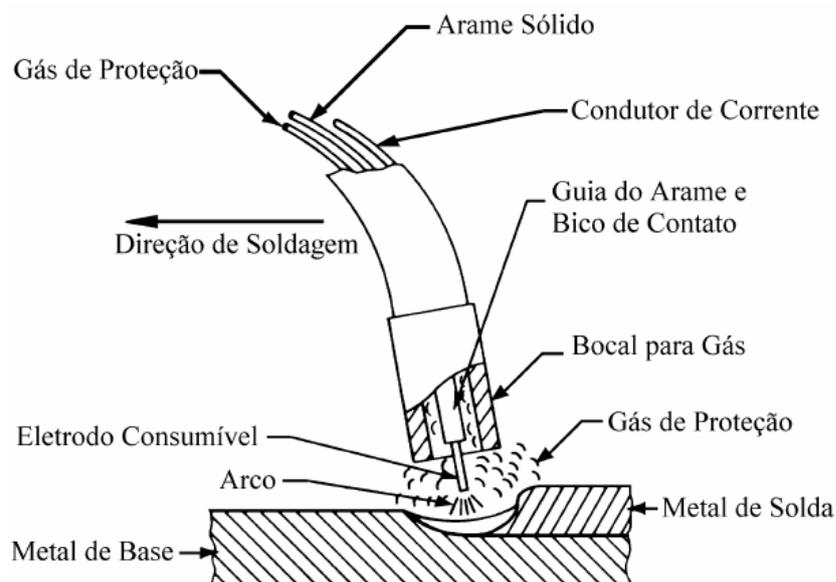


Figura 2.1: Processo de soldagem GMAW (AWS, 1991).

O equipamento de soldagem se constitui de fonte de energia, cabos de alimentação de energia, sistema de controle e alimentação de arame, tocha de soldagem, bobina de arame que quando energizado na extremidade da tocha é chamado de eletrodo (arame-eletrodo), cilindro de armazenamento de gás de proteção com manômetro e válvula de regulagem de vazão, tubos ou mangueiras para passagem do gás e pode ter ou não unidade de refrigeração da tocha (ESAB, 2014).

O processo pode ser automático, quando a tocha é conduzida pela máquina, ou semi-automático, quando a tocha é movimentada de maneira manual pelo operador. Ainda neste processo pode ocorrer uma auto regulação automática das características elétricas do arco e da taxa de deposição. Sendo exigido do operador a velocidade de deslocamento, o posicionamento da tocha e orientação (Vaydia, 2002).

As figuras 2.2 e 2.3 demonstram respectivamente os componentes necessários para aplicação e o esquema de montagem do processo de soldagem GMAW.

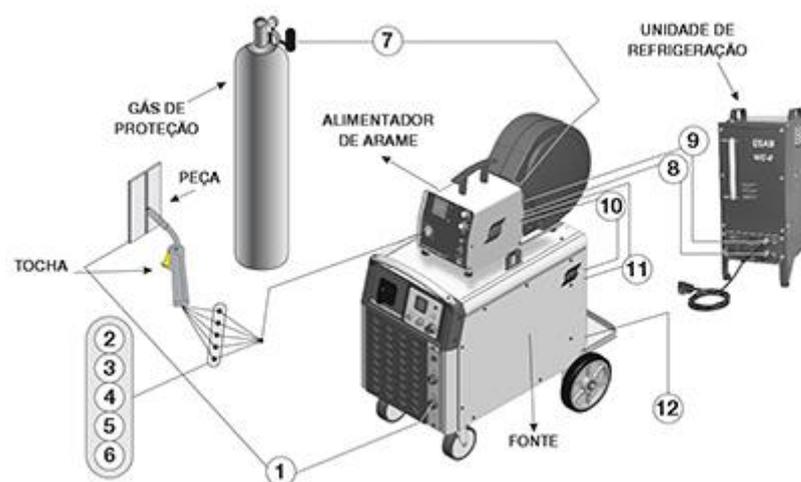


Figura 2.2: Componentes de um sistema de soldagem semiautomática para aplicação GMAW (adaptado de ESAB, 2014).

- 1 – Cabo de solda (Negativo)
- 2 – Refrigeração da tocha (entrada de água)
- 3 – Gás de proteção
- 4 – Gatilho da tocha
- 5 – Refrigeração da tocha (retorno da água)
- 6 – Conduíte do arame
- 7 – Gás de proteção vindo do cilindro
- 8 – Saída de água de refrigeração
- 9 – Entrada de água de refrigeração
- 10 – Cabo de comando (alimentador/fonte)
- 11 – Cabo de solda (positivo)
- 12 – Conexão para fonte primária.

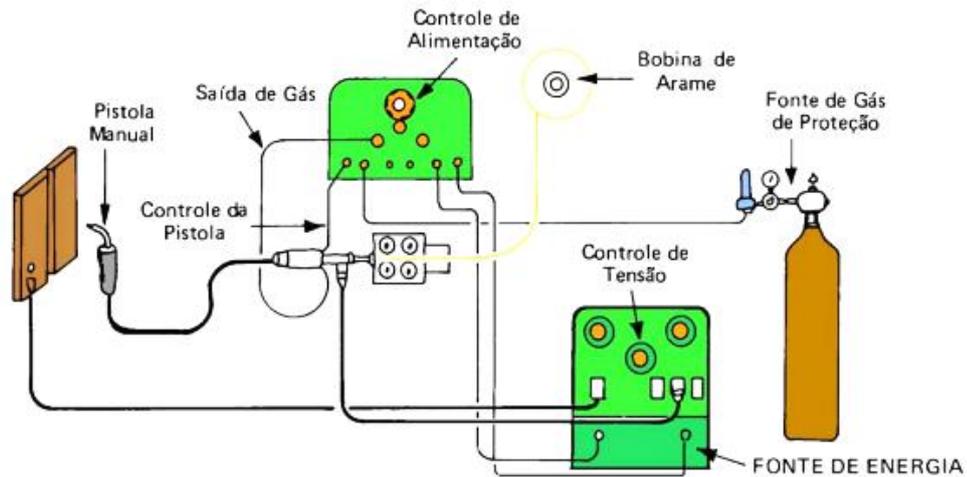


Figura 2.3: Esquema de montagem do equipamento para soldagem pelo processo GMAW (adaptado de ESAB, 2014).

### 2.1.2 Atmosfera Protetora

O gás de proteção tem como principal finalidade impedir a contaminação do arame, para que as gotas de metal fundido em transferência e a poça de fusão não sofra contaminação dos gases da atmosfera ( $N_2$ ,  $O_2$  e umidade). Outra função importante é ionizar o meio, que implica diretamente nas propriedades de estabilidade do arco, controle da transferência metálica, o consumo do eletrodo e a fusão do metal de base (Scotti e Ponomarev, 2014).

Tem-se a estabilidade do arco como a segunda função do gás de proteção, é relacionada com as propriedades físico-químicas do gás, tendo maior importância o potencial de ionização, a condutividade térmica e o potencial de oxidação, esses que afetam as características operacionais do arco de soldagem e suas propriedades mecânicas (Scotti e Ponomarev, 2014).

#### 2.1.2.1 Potencial de Ionização

Em condições normais os gases possuem uma característica comum de serem condutores de eletricidade. Todavia, os gases podem se ionizar, mediante condições satisfatórias de alta temperatura, baixíssima pressão ou submetidos a um campo elétrico de altíssima intensidade (Linnert, 1994). Ainda segundo o autor o potencial de ionização pode ser definido pela energia gasta em eV para ionizar o gás, ou seja, retirar um ou mais elétrons do átomo de gás, tornando-o em íon.

É uma importante característica dos elementos presentes no arco elétrico de soldagem, que possui uma atmosfera complexa formada por gases de proteção, metais em estado de vapor e elementos utilizados como fluxo. A facilidade com que estes materiais se tornam ionizados determina as condições de abertura do arco, a capacidade de o arco conduzir corrente elétrica e a estabilidade do arco (Linnert, 1994).

Utilizando uma mesma corrente de soldagem e mesmo comprimento de arco o gás de menor potencial de ionização vai apresentar maior facilidade para abertura de arco e maior estabilidade do processo. Por outro lado, utilizando um gás de alto potencial de ionização a tensão também deverá ser elevada (Scotti e Ponomarev, 2008). A tabela 2.1 mostra o potencial de ionização de vários gases e vapores de metal.

**Tabela 2.1: Potencial de ionização de gases e vapores metálicos em elétron volts (eV).**

Elemento	Potencial de Ionização (eV)		
	Estágio de ionização*		
	I	II	III
Alumínio	5,984	18,823	28,44
Argônio	15,755	27,62	40,90
Cálcio	6,111	11,87	51,21
Carbono	11,264	24,376	47,864
Césio	3,893	25,1	-
Hélio	24,580	54,40	-
Hidrogênio	13,595		
Ferro	7,90	16,18	30,64
Criptônio	13,99	24,56	36,9
Magnésio	7,644	15,03	80,12
Mercúrio	10,44	18,8	-
Nióbio	6,77	14	-
Nitrogênio	14,54	29,605	47,426
Oxigênio	13,614	35,146	54,934
Platina	8,9	18,5	-
Potássio	4,339	31,81	46
Silício	8,149	16,34	33,46
Prata	7,574	21,48	-
Sódio	5,138	47,29	71,65
Estrôncio	5,692	11,027	-
Titânio	6,83	13,63	28,14
Tungstênio	7,94	-	-
Xenônio	12,13	21,2	-

\*Os algarismos romanos indicam o número de elétrons que são perdidos no estado de ionização indicado.

**Fonte: Lancaster (1986).**

Para cada estágio de ionização de um mesmo gás o potencial de ionização aumenta. Isso é porque cada o elétron que é retirado do átomo, faz com que a atração do núcleo aumente em relação aos elétrons restantes, assim a cada estágio de ionização será necessária maior energia em eV para manter o meio ionizado. No estágio III se gasta mais energia que no estágio II que necessita de mais energia que o estágio I (Lancaster, 1986).

#### 2.1.2.2 Condutividade Térmica

A propriedade física de condutividade térmica do gás de proteção ionizado está relacionada com a quantidade de calor transferido pelo choque das partículas existentes na coluna de plasma. E influencia expressivamente na transferência metálica e no perfil de penetração do cordão na soldagem pelo processo GMAW (Suban e Tusek, 2001).

De acordo com Suban e Tusek (2001) gases de proteção constituído por moléculas de dois ou mais átomos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ ) seus componentes, conseguem se dissociar antes de serem ionizados, devido ao fenômeno de dissociação e recombinação molecular, favorecendo a eficiência de fusão e maior zona fundida. Gases com maior capacidade de troca de calor, demandam maior tensão de arco. Suban e Tusek (2001); AWS, welding handbook, v.1, (2001) afirmam que dentre os gases de proteção utilizados no processo GMAW, o argônio é o gás que apresenta menor condutividade térmica para qualquer que seja a faixa de temperatura na atmosfera do arco.

A variação da condutividade térmica dos principais gases utilizados nos processos de soldagem a arco em relação à temperatura absoluta é mostrada na figura 2.4. A condutividade térmica do He é maior que a do Ar, e a do  $\text{H}_2$  ultrapassa as duas (Schwedersky et al., 2011).

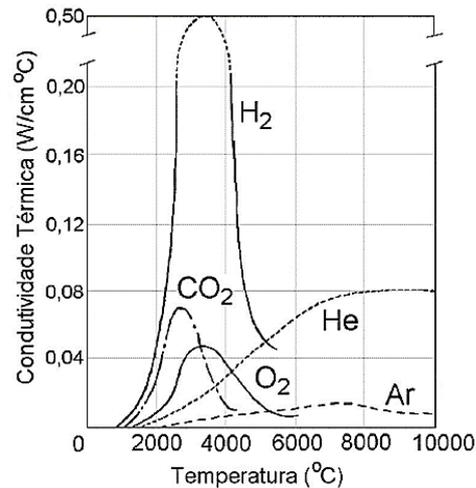


Figura 2.4: Condutividade Térmica de alguns gases em função da temperatura (Suban e Tusek, 2001).

A figura 2.5 mostra a influência da condutividade térmica na coluna de plasma em um arco de soldagem com gás Hélio (alta condutividade térmica) (a) e Argônio (baixa condutividade térmica) (b), ilustrando a transferência metálica e o perfil de penetração de solda do processo GMAW.

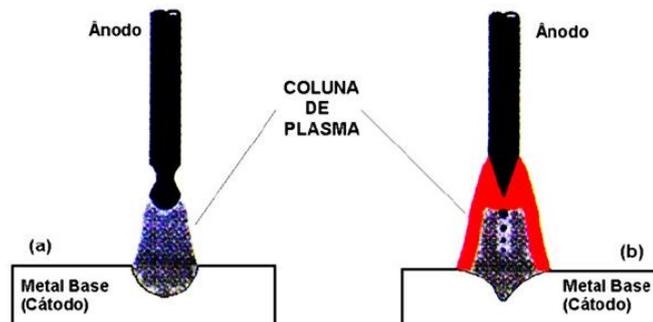


Figura 2.5: Tipo de transferência metálica e perfil de penetração em função da condutividade térmica do gás de proteção: (a) hélio; (b) argônio (Vaidya, 2002).

### 2.1.2.3 Potencial de Oxidação

Os gases e misturas gasosas oxidantes contendo  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar}+\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2+\text{O}_2$  e outros são extremamente utilizados industrialmente na soldagem. Nas soldagens em que estes gases estão envolvidos, uma significativa perda de elementos de liga e impurezas é observada no metal fundido ao arco, pela interação com o oxigênio. A razão da oxidação do metal pelo gás de proteção depende da composição de ambos e dos parâmetros de soldagem. O potencial de oxidação (PO) geralmente pode ser definido como a capacidade do gás de proteção oxidar um metal durante a soldagem (Novozhilov, 1988).

Um gás com alto poder de oxidação poder ser prejudicial por oxidar o metal de solda. Por este motivo se utiliza gases inertes (Ar e/ou He). Por outro lado, é necessário para criar uma camada de óxido na parte superficial da poça para facilitar a emissão de elétrons pela coluna de plasma (Scotti e Ponomarev, 2014).

Em metais mais reativos a camada de óxidos sobre a poça é suficiente para a estabilidade do arco (metais não ferrosos), os menos reativos, como é o caso dos aços, necessitam dos gases ativos para obtenção desta camada de óxidos na estabilidade do arco (Scotti e Ponomarev, 2008). Vale destacar que H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, são redutores em relação a estabilidade do arco e agem como inertes.

O potencial de oxidação de alguns gases também reage com o metal de adição e o metal base, normalmente formando escória. A percentagem volumétrica dos mesmos na mistura tem influência apreciável, visto que geram perdas de elementos de liga, afetam a quantidade de escória, quantidade de fumos, fluidez na poça de fusão, tenacidade e resistência mecânica do metal e entre outras propriedades (Vaidya, 2002).

Segundo Scotti e Ponomarev (2014) quanto maiores os teores de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> no gás de proteção (maior potencial de oxidação), mais elementos desoxidantes (Mn, Si e Al) deve ter o arame. Afirmam ainda que o potencial de oxidação dos gases afeta o formato do cordão de solda, todavia modifica a tensão superficial entre o metal fundido e o meio em sua volta (molhabilidade). O baixo potencial de oxidação dos gases reduz a molhabilidade e podem formar cordões irregulares e convexos.

De maneira empírica a equação 2.1 relaciona PO com o O<sub>2</sub>.

$$PO = \% O_2 + \left( \% \frac{CO_2}{2} \right) \quad \text{Equação 2.1}$$

### 2.1.3 O Arco Voltaico

O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos. Isto ocorre por apresentar ótimas combinações de características, como concentração adequada de energia para fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de risco à saúde (Modenesi, 2007). Possui inúmeras aplicações, como por

exemplo: fabricação de peças estruturais e recuperação de peças danificadas ou desgastadas.

Embora seja estudado um grande número de processos de soldagem, usar o arco elétrico como fonte de calor para a fusão ainda é viável, mesmo que os conhecimentos obtidos até o momento permitem um entendimento apenas parcial dos fenômenos envolvidos devido a sua grande complexidade (Waszink, 1982; Marques, et al. 2005).

Guile (1970) define que o arco elétrico é “uma descarga de corrente elétrica entre eletrodos em um gás ou vapor (gerado a partir dos eletrodos) que tem uma queda de tensão junto ao cátodo da ordem do potencial de excitação do vapor do eletrodo (isto é, da ordem de 10 V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um mínimo que é de cerca de 100 mA”.

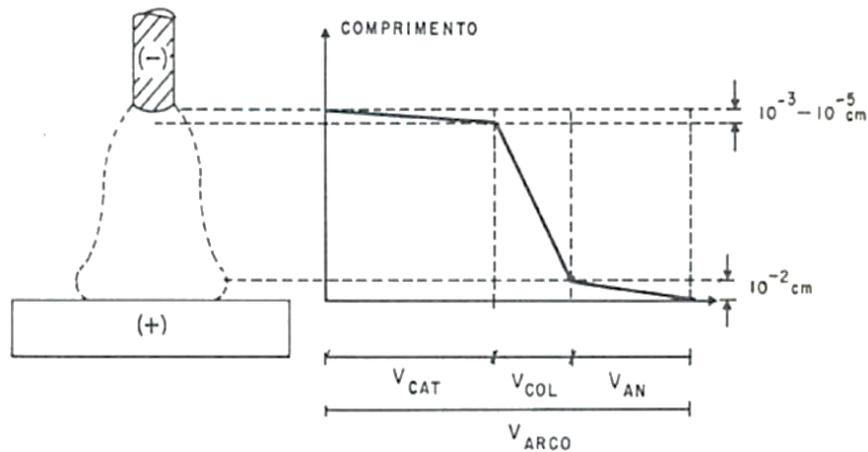
Segundo Scotti e Ponomarev (2008) existe uma região por onde passa uma grande quantidade de corrente, localizada entre a extremidade do arame-eletrodo e o metal de base, produzindo alta intensidade de luz e calor. Essa região é chamada de arco voltaico. A fusão de metais acontece pela ação direta e localizada do arco voltaico, sendo a fonte de calor.

Devido a condições favoráveis de ionização (item 2.1.2.1), os gases passam para o quarto estado da matéria, chamado de plasma, que são condutores de eletricidade. Para sustentar o plasma, basta manter uma corrente entre 50 e 1000 A, e uma tensão elétrica variando entre a peça e o eletrodo de 15 a 40 V, dependendo da característica de composição e geometria do arco (Scotti e Ponomarev, 2014).

#### 2.1.3.1 Caracterização do Arco Voltaico Aplicado à Soldagem e suas Regiões

Em soldagem é aceito que o arco voltaico no sentido longitudinal é composto por três regiões – coluna de plasma, região anódica e região catódica. Como passa corrente nestas regiões, haverá queda de tensão em cada uma delas. Em experimentos com eletrodos nus consumíveis verifica-se uma maior queda de tensão na região catódica (Scotti e Ponomarev, 2014; Cayo e Alfaro, 2012).

A figura 2.6 mostra a distribuição das três regiões de modo que a queda de potencial ao longo do arco elétrico não é uniforme, ela se dá de forma brusca nas regiões próximas aos eletrodos (ânodo e cátodo) e em intensidade menor na coluna do arco (Balmer, 2009).



**Figura 2.6: Representação esquemática da queda de tensão ao longo de um arco.  $V_{CAT}$  - zona de queda catódica;  $V_{COL}$  - coluna do arco e  $V_{AN}$  - zona de queda anódica (adaptado de Balmer, 2009).**

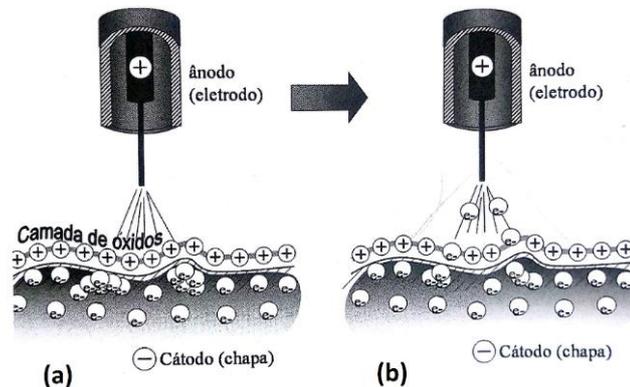
- A Zona de queda anódica é fundamental para a continuidade do arco, não é de muita importância para a manutenção do arco se comparado com a zona catódica. O ânodo possui maior quantidade de elétrons, pelo fato de não emitir íons positivos, o que gera queda de tensão nesta zona. Experimentos apontam uma queda de tensão que varia de 2 a 8 V em condições de soldagem. A queda anódica depende de vários fatores, tendendo a se reduzir com a temperatura do ânodo e a aumentar com a sua condutividade térmica (Scotti e Ponomarev, 2014).

- A zona de queda catódica, ainda que tenha pequeno volume, é de suma importância para a manter o arco elétrico, dela que afloram os elétrons que vão fluir pelo arco e que são responsáveis em grande parte pela condução da corrente de soldagem (Lesnewich, 1958). Por possuir pequeno volume o estudo desta zona torna-se difícil, devido elevados valores térmicos. Esta região se caracteriza por um estado muito afastado do equilíbrio, tanto de equilíbrio térmico como de equilíbrio elétrico, ao contrário do que parece ocorrer na coluna do plasma a 1 atm.

Para que haja emissão de elétrons nessa região, existe a dependência de outros mecanismos atuando, com destaque para o mecanismo de emissão catódica.

A emissão catódica é o fenômeno de emissão de elétrons em soldagens de eletrodos consumíveis. A figura 2.7 explica como esse mecanismo acontece. Elétrons são mais facilmente emitidos por camadas de óxidos que se formam sobre a poça e arredores, com cargas positivas (Scotti e Ponomarev, 2008). Os autores ainda afirmam que um alto gradiente de tensão entre a camada e o metal base, faz com que os elétrons se agrupem e acelerem em direção ao ânodo, com essa aceleração os elétrons quebram a camada de óxidos localmente e viajam através da coluna de plasma até o ânodo. Esse fenômeno evita um valor muito alto de tensão

entre o eletrodo e o metal base. Os locais ou pontos onde ocorrem essas emissões de elétrons são denominados pontos catódicos.



**Figura 2.7: Representação esquemática do mecanismo de emissão catódica – (a) formação de camada de óxidos com carga positiva e agrupamento dos elétrons; (b) quebra localizada da camada de óxidos e emissão dos elétrons (adaptado de Modenesi, 2012).**

Para facilitar o fenômeno de emissão catódica no processo de soldagem GMAW é fundamental a utilização de gases de proteção com pequenas porcentagens de oxigênio, que explica a melhor estabilidade de soldagem com eletrodos consumíveis, evitando que o arco procure por óxidos fora de seu eixo. Devido a isso aços ao carbono de baixa oxidação devem ser soldados com gases reativos (Scotti e Ponomarev, 2008).

Desta maneira o potencial de oxidação, o potencial de ionização e a condutividade térmica dos gases são responsáveis pela maior ou menor facilidade de emissão de elétrons – maior ou menor tensão do arco.

### 2.1.3.2 Coluna de Plasma

A coluna de plasma é um meio ionizado e compreende quase todo o volume do arco, sendo constituído de partículas neutras (moléculas e átomos), cátions, íons e elétrons livres, que se encontra em equilíbrio, ou estado de quase-equilíbrio. Como há grande energia térmica envolvida, existe troca de calor com meio externo, por meio de convecção e radiação a medida que a coluna de plasma se afasta do eletrodo, a temperatura cai de maneira exponencial, devido a área de troca de calor ser maior (Scotti e Ponomarev, 2014). A figura 2.8 mostra que a temperatura é maior próxima ao eletrodo.

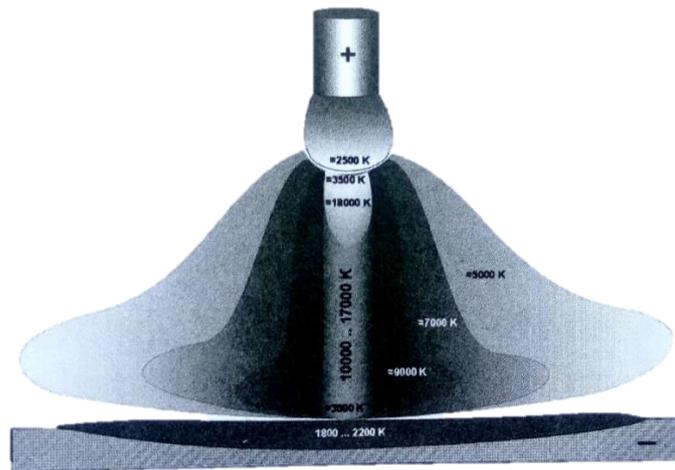


Figura 2.8: Representação esquemática da perda térmica ao longo da coluna de plasma, devido a troca de calor com o meio externo (Scotti e Ponomarev, 2014).

Devido à queda de calor ao longo do plasma, é preciso adicionar calor para manter ou reionizar o meio, o que é conseguido pela passagem de corrente através do plasma, com o choque de vários elétrons de alta energia cinética e átomos. Quanto maior o potencial de ionização do átomo, maior energia necessária (Scotti e Ponomarev, 2014).

A medida que a temperatura de um gás é elevada, a energia de suas moléculas aumenta, estando este aumento ligado principalmente com a translação e vibração das moléculas, proporcionando a dissociação em átomos. A temperaturas ainda mais altas, um elétron nas camadas mais externas pode ser expulso dos átomos quando estes se chocam em grande velocidade, ocorrendo a ionização. A temperaturas ainda maiores, mais elétrons podem ser expulsos, tendo-se a ionização múltipla (Modenesi, 2012). A dissociação e a ionização podem ser representadas como:

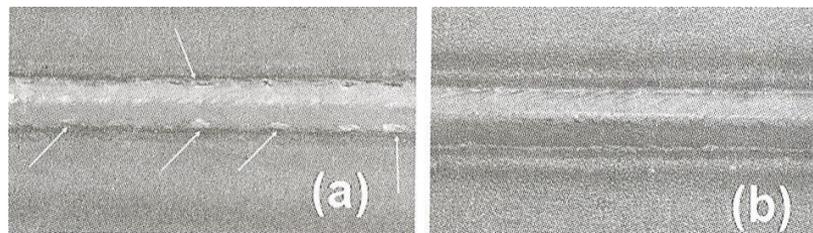


Isso explica a utilização de tensão elevada em gases de alto potencial de ionização e de alta condutividade térmica e também uma maior demanda de tensão na ignição e reignição do arco elétrico (Scotti e Ponomarev, 2014).

#### 2.1.4 Formação da Escória

Muitos que utilizam o processo GMAW, não se dão conta da inter-relação do teor de desoxidante do arame e o potencial de oxidação do gás de proteção. A presença de  $O_2$  (oxigênio) facilita a emissão de elétrons, que podem ser adicionados

ao gás de proteção de maneira intencional. Si e Mn são os principais elementos de desoxidação utilizados em arames para soldar aços carbono e de baixa liga. Estes elementos do arame são utilizados para reagir com o oxigênio, que formam óxidos e vão para superfície do cordão de solda, quando solidificado. Estes óxidos dá-se o nome de escória e são de fácil remoção. Caso o gás possua baixo potencial de oxidação, e não houver oxigênio suficiente para reagir com o Si e Mn, estes elementos vão para o cordão de solda como elementos de liga. Dependendo do teor de Si, o cordão de solda pode se fragilizar, já o Mn é benéfico. Portanto uma escolha correta da relação arame/gás de proteção, pode indicar uma mínima presença de escória, por outro lado, não combinar o potencial de oxidação do gás com o teor de desoxidação dos elementos do arame, resulta em porosidade ou em propriedades mecânicas em não conformidade (Scotti e Ponomarev, 2008).



**Figura 2.9: Cordões de solda feitos pelo processo MIG/MAG com combinação arame / gás de proteção que produz escória (a) e com combinação arame / gás de proteção que não produz escória (b) (Scotti e Ponomarev, 2014).**

Diferente de outros processos que geram escória, tais como SMAW (soldagem arco elétrico com eletrodo revestido) e SAW (soldagem por arco submerso), a escória formada pelo processo de soldagem GMAW não tem a função de ajudar no resfriamento do cordão de solda. Algumas características da escória são: oferecer baixa permeabilidade aos gases, se solidificar a temperaturas mais alta, ter densidade menor que o metal de base e ser de fácil remoção (Linnert, 1994).

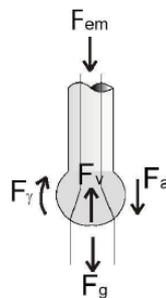
## 2.2 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO GMAW

Entende-se por transferência metálica a maneira ou modo pelo qual o metal líquido se transfere da ponta do eletrodo para a poça de fusão através do arco elétrico (Modenesi, 2007). A maneira como ocorre a transferência, influencia nos aspectos operacionais, na eficiência de deposição, no nível de respingos e fumos, na capacidade do processo ser utilizado fora da posição plana, na geometria dos

cordões, na estabilidade do processo e no desempenho operacional (Kim e Eagar, 1993; Heald *et al.* 1994).

Existem diversos processos de soldagem disponíveis, muitos já foram estudados e foi encontrado vários modos de transferência metálica. Para um determinado processo de soldagem existem condições específicas de parâmetros a ser adotado para determinar o modo do qual o metal de adição é adicionado a poça, ou seja, da combinação dos seguintes parâmetros: corrente e tensão de soldagem, polaridade do eletrodo, material do eletrodo, diâmetro do eletrodo, distância entre o bico de contato e a peça (DBCP), tipo de gás de proteção e pela pressão ambiente (AWS, 1991; Machado, 1996; Jones *et al.* 1998).

Além dos parâmetros de soldagem, existem outros fenômenos que podem influenciar no crescimento, dimensões e frequência de destacamento das gotas do metal fundido. Um destes fenômenos é a teoria das forças estáticas (figura 2.10), que segundo (Scotti e Ponomarev, 2014) a gota do metal fundido somente é transferida quando o somatório de forças de destacamento supera o somatório das forças de retenção. As principais forças que agem sobre as gotas são: a força gravitacional, força de vaporização, força de arraste de gases, a força eletromagnética e a força devido à tensão superficial do metal fundido.



**Figura 2.10:** Forças governantes na gota pelo processo de soldagem GMAW, em que  $F_\gamma$  representa a força devido a tensão superficial,  $F_g$  à gravidade,  $F_{em}$  ao efeito eletromagnético,  $F_a$  ao arraste pelo fluido e  $F_v$  à vaporização (Barra, 2003).

Um segundo fenômeno ocorre quando a corrente de soldagem atinge um determinado valor, chamado de corrente de transição. Pesquisadores indicam que abaixo da corrente de transição as forças de equilíbrio estático predominam, porém acima, este fenômeno não é aceito, devido a dinâmica criada na transferência das gotas. Neste caso a Teoria de Instabilidade de Pinch pode ser usada para explicar como ocorre a transferência metálica (Scotti e Ponomarev, 2014; Slania, 1996).

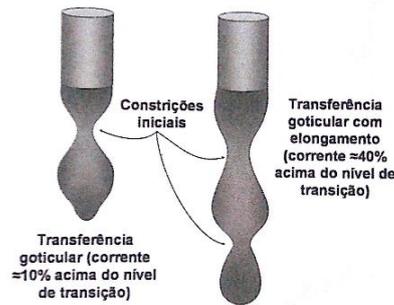


Figura 2.11: Ilustração do fenômeno de instabilidade da coluna de metal líquido conforme a Teoria da Instabilidade de Pinch (Scotti e Ponomarev, 2008).

### 2.2.1.1 Classificação dos Modos de Transferência Metálica

A maneira como a gota se comporta quando é transferida da ponta do eletrodo para a poça de fusão é o modo de transferência. Essa transferência pode acontecer com gotas grandes, em contraste com gotas pequenas pelo mesmo caminho (Scotti e Ponomarev, 2008).

De acordo com Scotti e Ponomarev (2014) a soldagem GMAW distingue-se de três classes de modos de transferência metálica, a saber, naturais, controlados e intercambiáveis, como ilustrado na figura 2.12.

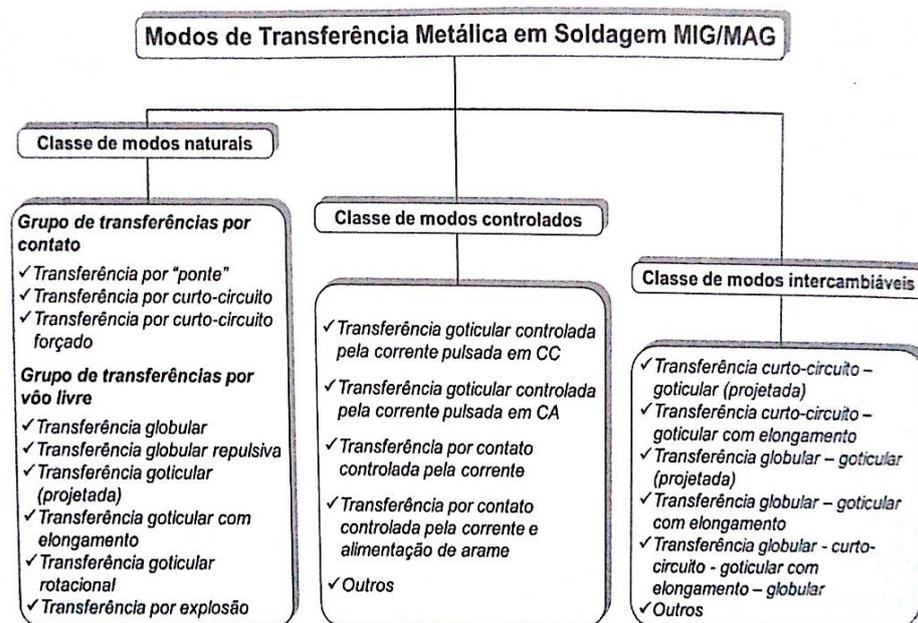
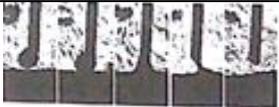
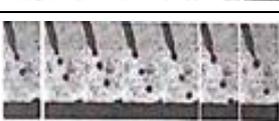


Figura 2.12: Classificação dos modos de transferência metálica conforme a ordem hierárquica (classes, grupos e modos) (Scotti e Ponomarev, 2014).

O grupo mais comum de transferência metálica é o de classe natural, e como a tabela 2.2 mostra, acontece de duas maneiras, por contato (a gota se destaca

quando há contato com a poça) e por vô livre (a gota se destaca antes do contato com a poça) (Scotti e Ponomarev, 2014). A tabela 2.2 mostra os modos de transferência metálica por contato e por vô livre.

**Tabela 2.2: Classes e respectivos modos natural de transferência metálica que acontecem no processo GMAW.**

<b>Grupos de Transferência</b>	<b>Modo de Transferência</b>	<b>Imagem</b>	<b>Força (efeito) governante principal</b>
Por contato	Por curto-circuito		Tensão superficial e efeito <i>pinch</i>
	Por "ponte"		Tensão superficial
	Por curto-circuito forçado		Efeito <i>pinch</i> pronunciado
Por vô livre	Globular		Gravitacional
	Globular repulsiva		Força gravitacional e forças de repulsão
	Goticular (ou goticular projetada)		Força eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular Rotacional		
	Explosiva		Força eletromagnética e reações químicas

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014).

### 2.2.2 Modos Naturais de transferência Metálica

A tabela 2.2 apresenta vários modos natural de transferência metálica, porém existem três modos que são amplamente aceitos e mais facilmente detectados. São eles: transferência metálica por curto-circuito, globular e aerossol (também conhecido como spray, ou goticular). Um esquema pode ser mostrado pela figura 2.13 em um diagrama tensão x corrente. Ao utilizar argônio como gás de proteção, a transferência por curto-circuito é estável para baixos valores de tensão e uma ampla

faixa de corrente, enquanto que para a transferência globular é necessário o uso de maiores valores de tensão e a corrente deve ser mais baixa. Já para a transferência em spray, devem ser utilizados altos valores de corrente e tensão (Modenesi e Bracarense, 2007).

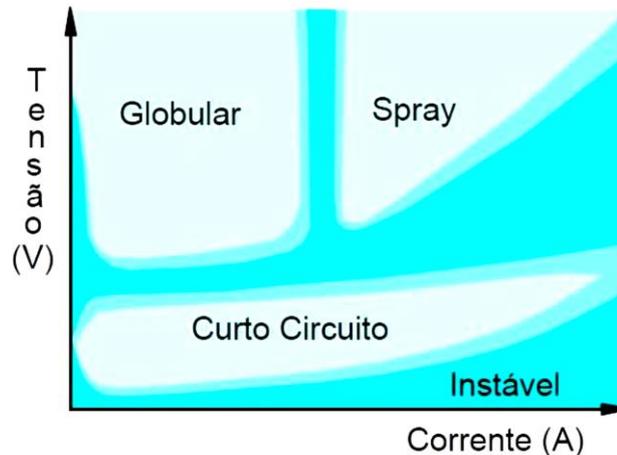


Figura 2.13: Esquema de tensão x corrente para demonstrar as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (Modenesi e Bracarense, 2007).

#### 2.2.2.1 Transferência metálica por curto-circuito

A transferência metálica por curto-circuito utiliza as menores faixas de corrente e diâmetros de arame no processo GMAW. Esse tipo de transferência produz pequena poça de fusão, de resfriamento rápido, sendo geralmente indicada para soldagem de seções finas, soldagem fora da posição plana e uniões com abertura excessiva de raiz. Nesse processo, o metal é transferido do eletrodo para a poça somente durante o período que a gota faz o contato. A frequência de contato varia de 20 a 200 vezes por segundo, a figura 2.14 mostra como ocorre o processo de destacamento da gota (FBTS, 2015).

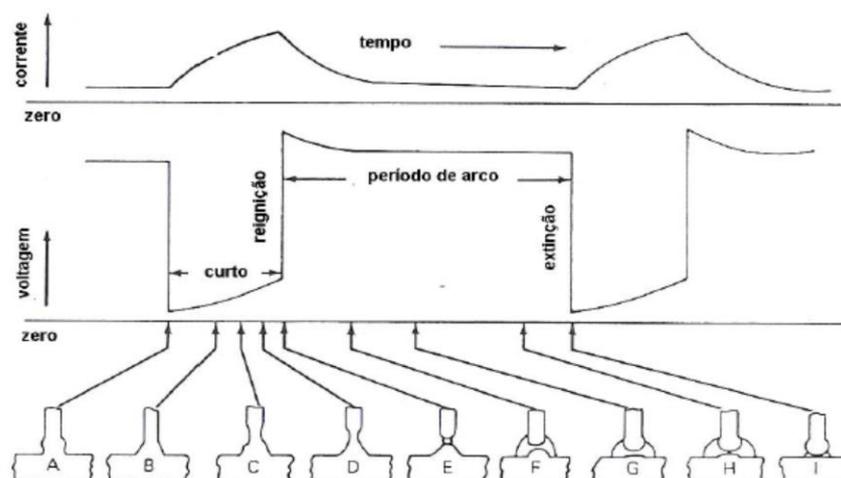


Figura 2.14: Representação esquemática da transferência por curto circuito (FBTS, 2015).

Como ocorre uma violenta separação da gota do metal líquido no momento da sua transferência, isso acaba provocando um nível excessivo de respingos. No caso de transferência por curto-circuito a taxa de deposição é a menor entre os três tipos de transferência (DeRuntz, 2003).

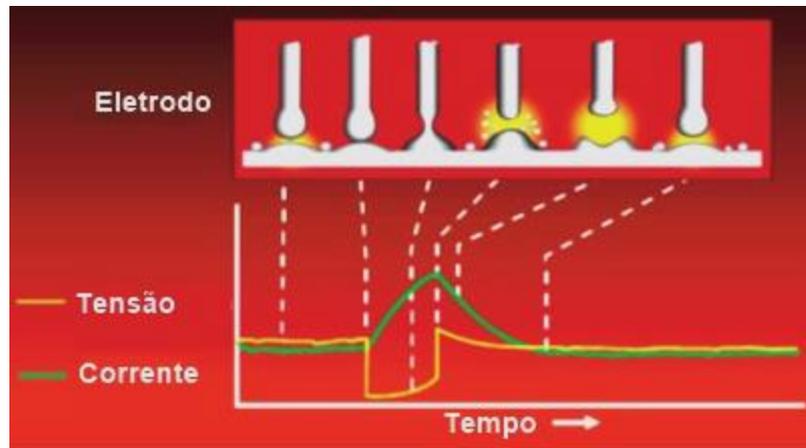


Figura 2.15: Representação esquemática da geração de respingos no destacamento da gota utilizando transferência por curto-circuito (DeRuntz, 2003).

A Figura 2.16 apresenta oscilogramas de tensão e corrente em função do tempo gerados a partir do monitoramento dos sinais elétricos na transferência por curto-circuito, utilizando um arame de aço inoxidável de 1,0 mm de diâmetro com gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> (Modenesi e Bracarense, 2009).

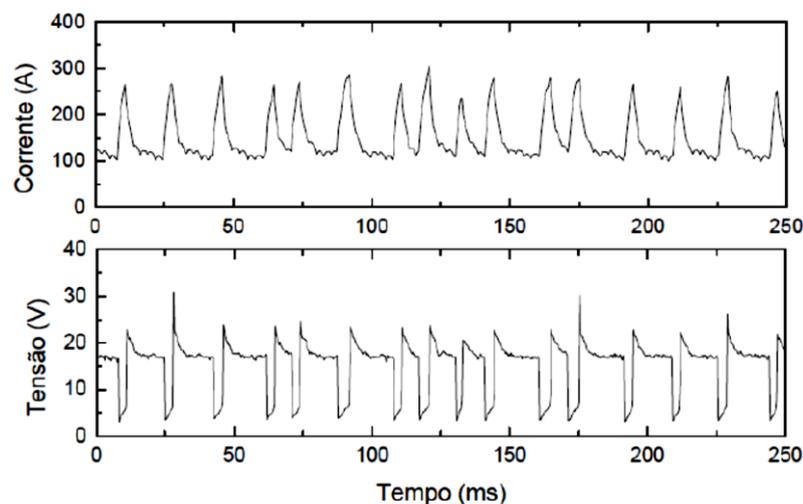


Figura 2.16: Oscilogramas da transferência por curto-circuito para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O<sub>2</sub> (Modenesi e Bracarense, 2009).

Na transferência por curto-circuito, o comprimento do arco é diminuído de forma que a gota formada na ponta do arame toca a poça de fusão da solda antes que seja destacada pela ação da gravidade como no modo globular. Com isto, ocorre um curto circuito elétrico e o arco é extinto. Com o curto-circuito, a corrente

tende a se elevar rapidamente, aumentando a fusão do eletrodo por efeito joule e, ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. Com isto, o curto-circuito é rompido, o arco é restabelecido e este processo é repetido ciclicamente (Smith, 1962; AWS, 1991).

Segundo Scotti e Ponomarev (2014) alguns parâmetros derivados destes oscilogramas que podem ser utilizados são o período de transferência de metal (T), o tempo de duração de curto-circuito ( $t_{cc}$ ) e o fator de curto-circuito ( $F_{cc}$ ). Essas variáveis estão representadas pela seguinte expressão:

$$F_{cc} = \frac{t_{cc}}{T} \times 100 (\%) \quad \text{Equação 2.4}$$

O fator de curto circuito em %, indica a fração do tempo durante a soldagem em que o arame está em contato com a poça de fusão, ou seja, em curto circuito.

O gás de proteção influencia nas características operacionais do arco e na penetração da solda. O gás CO<sub>2</sub> geralmente produz muitos respingos se comparado a um gás inerte (por exemplo o Argônio), mas o CO<sub>2</sub> promove grande penetração. Para obter um equilíbrio adequado entre incidência de respingos e penetração, misturas de Argônio e CO<sub>2</sub> são frequentemente usadas na soldagem de aços carbono e aços de baixa liga (Scotti e Ponomarev, 2014).

#### 2.2.2.2 Transferência Globular

A transferência do tipo globular acontece quando se utiliza corrente do tipo (CC+) com valor relativamente baixo. Esse tipo de transferência é caracterizado pela formação de gotas com diâmetro superior ao do eletrodo, que facilmente se desprendem pela ação da gravidade, o que limita essa transferência somente para aplicação na posição plana. Nesse caso, o arco de soldagem deve ser suficientemente longo para permitir o desprendimento das gotas antes que estas encostem na poça de fusão. No entanto, soldas feitas usando alta voltagem e elevado comprimento de arco, são frequentemente inaceitáveis por resultar em penetração insuficiente, falta de fusão e reforço excessivo. Essas ocorrências limitam o uso da transferência globular em soldagens de produção. Para misturas ricas em CO<sub>2</sub> e hélio, esta forma de transferência ocorre em uma faixa mais ampla

de corrente (FBTS, 2015). A figura 2.17 apresenta uma representação esquemática deste tipo de transferência.

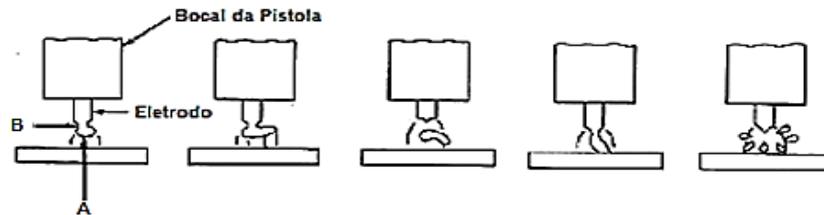


Figura 2.17: Representação esquemática de transferência globular. Nela pode-se observar a formação da gota (A) e o seu desprendimento para a formação da poça de fusão (B) (adaptado FBTS, 2015).

A figura 2.18 mostra oscilogramas de corrente e tensão de uma transferência globular. Observa-se neste oscilograma uma variação de tensão e corrente de soldagem típicas do destacamento de uma gota de metal.

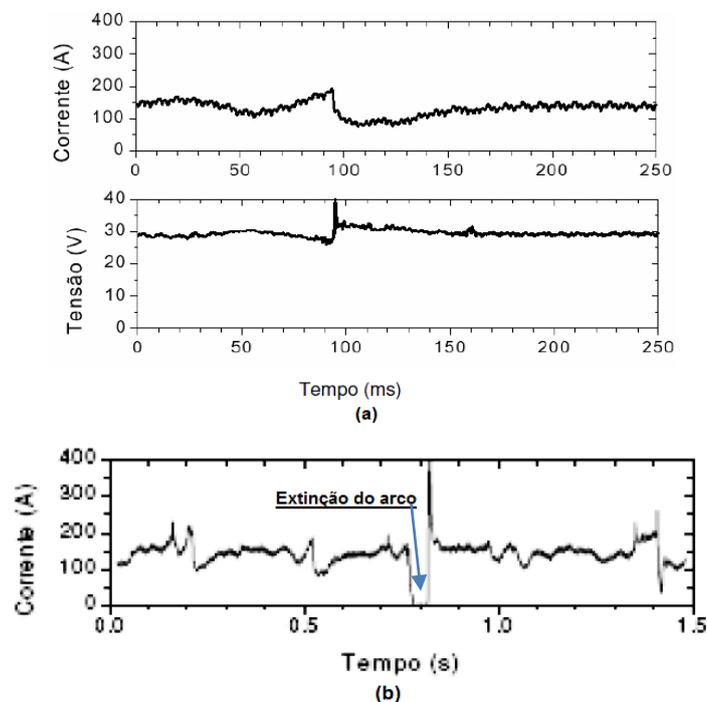


Figura 2.18: Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência globular em 250 ms (a) e 1,5 s (b). Arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção  $\text{CO}_2$  (Modenesi, 2004).

### 2.2.3 Transferência Goticular ou Spray ou Aerosol

A transferência tipo Spray é produzida com gás de proteção rico em Argônio e é possível produzir um spray axial muito estável e sem respingos conforme ilustrado na Figura 2.19 (Modenesi e Bracarense, 2009).

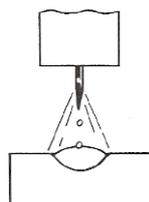


Figura 2.19: Representação esquemática de transferência spray (projetada) (FBTS, 2015).

Isso requer o uso de (CC+) com nível de corrente acima de um valor crítico denominado “corrente de transição”. Abaixo desse nível, a transferência ocorre na forma globular, com taxa de transferência de poucas gotas por segundo. Acima da corrente de transição, a transferência é de gotículas a uma taxa de centenas a cada segundo. Essas gotículas são então aceleradas axialmente através da coluna do arco. A corrente de transição varia conforme o diâmetro do arame-eletrodo, sua composição, o metal de base e o gás de proteção. A tabela 2.3 apresenta faixas de correntes de transição para aços carbono (FBTS, 2015).

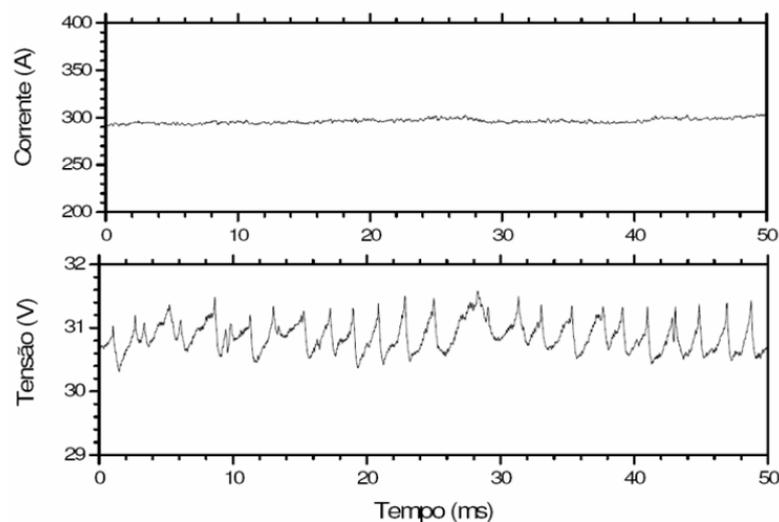
Tabela 2.3: Faixas de corrente de transição típicas para aços-carbono e diferentes diâmetros de eletrodo e gases de proteção (lembrar que a faixa de corrente de transição depende de outros fatores operacionais, como a composição e comprimento livre reais de arame).

Material do arame-eletrodo	Atmosfera protetora	Diâmetro de arame-eletrodo (mm)	Corrente de transição (A)
Aços-carbono	98%Ar+2%O <sub>2</sub>	0,6	130 – 135
		0,8	150 – 160
		0,9	160 – 170
		1,0	180 – 190
		1,1	210 – 230
		1,2	220 – 240
		1,6	260 – 280
	95%Ar+5%CO <sub>2</sub>	0,8	130 – 135
		1,0	180 – 190
		1,2	230 – 250
		1,6	270 – 285
	92%Ar+8%CO <sub>2</sub>	0,8	145 – 155
		1,0	190 – 200
		1,2	240 – 260
		1,6	280 – 295
	85%Ar15%CO <sub>2</sub>	0,8	150 – 160
		1,0	195 – 205
		1,2	250 – 270
		1,6	285 – 300
	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>	0,8	155 – 165
1,0		200 – 210	
1,2		265 – 280	
1,6		320 – 345	

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014).

A transferência no modo spray resulta numa corrente de gotas aceleradas por forças do arco a velocidades que superam a força gravitacional. Por causa disso, o spray, sob certas condições, pode ser usado para soldagem em todas as posições. Por outro lado, a alta taxa de deposição característica do spray, produz um volume de poça de fusão acima do que pode ser suportado para soldagem nas posições verticais e sobre-cabeça, o que na prática restringe o uso do spray somente para a posição de soldagem plana. Nessa transferência não ocorrem respingos (Scotti e Ponomarev, 2014).

A Figura 2.20 mostra oscilogramas na soldagem com transferência por *spray* utilizando o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro com gás de proteção Argônio + 2%O<sub>2</sub>. Os valores de corrente elevados estão em torno de 290 A e não variam significativamente. Os valores de tensão elevados estão em torno de 30 V (Modenesi e Bracarense, 2009).



**Figura 2.20:** Oscilogramas de um processo com transferência spray. Arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O<sub>2</sub> (Modenesi e Bracarense, 2009).

### 2.3 GASES DE PROTEÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

Como discutido anteriormente, o processo de soldagem GMAW necessita de um fluxo de gás para proteger o arame-eletrodo e o metal de base. Por esta função ele é denominado de proteção, porém ele também atribui outros efeitos adicionais para o processo.

(Scotti e Ponomarev, 2008) falam que a eficiência de proteção está relacionada com o tipo de gás, configuração do bocal da tocha e da junta, assim como a vazão do gás. Algumas informações sobre essas variáveis estão descritas abaixo:

- Configuração do bocal da tocha: Maiores valores de corrente demandam bocais maiores e mais afastados;
- Configuração da junta: A Figura 2.20 ilustra como exemplo a influência da configuração da junta na regulação da vazão do gás de proteção;

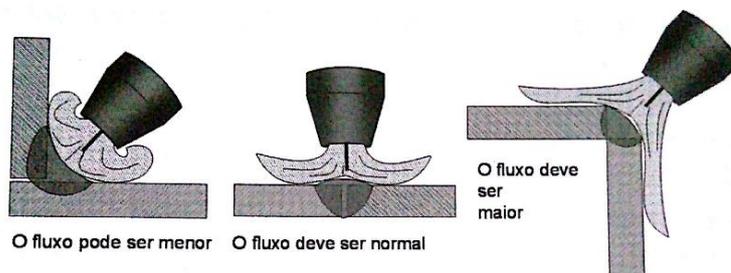


Figura 2.21: Influência da configuração da junta na regulação da vazão do gás de proteção (Ponomarev e Scotti, 2008).

Uma das propriedades do gás que facilita na proteção com meio ambiente é a densidade relativa. Fazendo uma analogia de densidade entre os gases inertes o Argônio (Ar) e o Hélio (He). O Argônio que é mais denso que o ar atmosférico terá maior facilidade de proteção do conjunto arame-eletrodo/metal de base, que o He que possui menor densidade que ar atmosférico, na posição plana. Agora ocorra a necessidade de uma solda na posição sobre-cabeça o gás He terá maior facilidade que o Ar, por outro lado precisará de uma vazão maior, pelo motivo de ser mais leve que o ar atmosférico (Scotti e Ponomarev, 2008). A tabela 2.4 relaciona as principais propriedades dos gases de proteção convencionais.

Tabela 2.4: Propriedades dos gases de proteção (em comparação com o ar atmosférico).

Gás	Símbolo químico	Peso molecular	D (Kg/m <sup>3</sup> )	PI (eV)	CT (mW/m.K)	Cv (kJ/Kg°C)
Argônio <sup>a</sup>	Ar	39,9	1,78	15,8	16,4	0,314
Dióxido de carbono <sup>a</sup>	CO <sub>2</sub>	44,0	1,98	14,4	14,7	0,657
Hélio <sup>a</sup>	He	4,0	0,18	24,6	142,6	3,11
Hidrogênio <sup>a</sup>	H <sub>2</sub>	2,1	0,07	13,5	168,5	10,17
Nitrogênio <sup>a</sup>	N <sub>2</sub>	28,0	1,16	14,5	24,0	0,742
Oxigênio <sup>a</sup>	O <sub>2</sub>	32,0	1,33	13,2	24,2	0,653
Propileno <sup>b</sup>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,08	1,81	9,13	14,7	-

D = densidade do gás, medida à 0°C e 1 atm (densidade do ar atmosférico ≈ 1,2); PI = potencial de ionização; Cv = capacidade específica de calor a volume constante, medida a 21,1°C e 1 atm; CT = condutividade térmica, medida a 0°C e 1 atm.

Fonte: a) Scotti e Ponomarev (2014); b) Adaptado de The National Institute of Standards and Technology (2014).

Ainda fazendo uma analogia entre os dois gases inertes relacionados acima, e o CO<sub>2</sub> podemos verificar a influência de uma outra propriedade. A condutividade térmica, que determina o qual um gás pode variar o perfil de penetração no metal de base. Figura 2.22 ilustra os aspectos das gotas e o padrão de penetração de acordo com os gases de proteção relacionados no processo de soldagem GMAW (Teske, 2006).

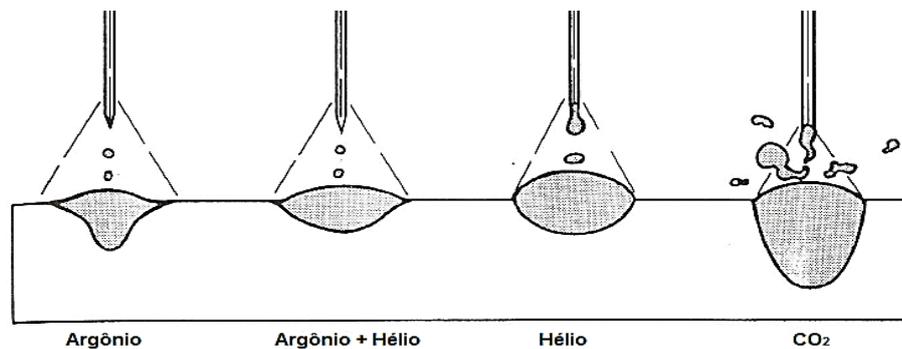


Figura 2.22: Aspectos das gotas e o padrão de penetração para diferentes gases de proteção (FBTS, 2015).

### 2.3.1 Principais Gases de Proteção Utilizados

Para efeitos do processo de soldagem GMAW a escolha do gás de proteção depende não só dos fatores do material e também do modo operacional do processo (Scotti e Ponomarev, 2014).

(Quintino e Pires 1996) comentam que o desenvolvimento dos gases para aplicações em soldagem tem sofrido um grande impulso, principalmente por duas razões: para aumentar a produtividade e para melhorar as características metalúrgicas da junta soldada. O usuário pode, no entanto, não alcançar os resultados esperados, na aplicação da mistura do gás de proteção para soldagem, face as dificuldades quando na escolha do gás, devido à falta de informações detalhadas, sobre as características operacionais destes gases.

Segundo Jönsson, Murphy e Szekely (1995) a tenacidade do metal de solda aumenta quando seu conteúdo de oxigênio é reduzido. Isto ocorre porque as inclusões de óxidos no metal de solda serão poucos e menores. O uso de um gás de proteção com elevado potencial de oxidação também pode resultar em porosidade no metal de solda.

Os principais tipos de gases de proteção utilizados neste processo são o argônio, o hélio, o dióxido de carbono e o oxigênio. Não menos importante, mas menos utilizados o nitrogênio e o hidrogênio (Scotti e Ponomarev, 2014).

### **a) Gases Inertes**

- Argônio é um gás incolor, inodoro, insípido, monoatômico e inerte. Isto quer dizer que ele não reage com outros elementos para formar óxidos. Extraído da atmosfera, sua quantidade é somente de 0,934% na mesma. O argônio é facilmente separado como um sub-produto, durante a produção em grande escala do oxigênio e nitrogênio puro, viabilizando seu baixo custo (Tusek e Suban, 2000).

O argônio se destaca principalmente por possui alto potencial de ionização (que permite boa iniciação do arco) e maior densidade que o ar. Ele puro somente se utiliza para soldas de metais não ferrosos e reativos (Linnert, 1944).

Hélio também é inerte, por não ser obtido da atmosfera como o argônio é mais caro (retirado de minas principalmente no Canadá e EUA). Possui alta condutividade térmica, baixa densidade (o que prejudica na soldagem na posição plana) e baixo potencial de ionização (dificuldade na abertura do arco) (Scotti e Ponomarev, 2008).

A alta condutividade térmica possibilita reduzir a corrente de soldagem, permite velocidades de soldagem mais elevadas e boa soldagem de materiais com alta capacidade de troca de calor (Scotti e Ponomarev, 2014).

De acordo com as referências (AWS, 1991, Wainer, *et al.*, 1992, Vaidya, 2002), o argônio e o hélio embora sejam ambos gases inertes, possuem suas propriedades físicas bastante dissimilares, em particular, o potencial de ionização e a condutividade térmica. Esses gases são utilizados puros ou combinados entre si, visando aproveitar características de cada um deles.

O formato do cordão de solda (largura, altura e profundidade de penetração) assume características bastante diferenciadas quando o argônio ou o hélio é utilizado como gás de proteção. O argônio produz cordões de solda com muito maior penetração no centro do que nas bordas, devido à baixa condutividade térmica deste gás manter a coluna de plasma com maior temperatura no centro. Utilizando-se hélio como gás de proteção o cordão de solda apresenta uma grande penetração e uniformemente distribuída, devido o calor ser distribuído na junta a ser soldada, por sua maior condutividade térmica e requerer maior energia para sua estabilidade, em função do alto potencial de ionização (Teske, 2006).

## **b) Gases Oxidantes**

- Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) na soldagem GMAW é muito utilizado em misturas binárias e ternárias de Ar/He, em baixos teores. Para aços de baixo carbono pode ser utilizado puro. Quando em altas temperaturas do arco, ocorre a dissociação em  $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$  e se ioniza facilitando a transferência de elétrons pelo arco. Possui geometria do cordão similar ao do He, tem dificuldade para manter o arco aberto (precisa de maior tensão), evitar arco muito curto em composição rica em  $\text{CO}_2$  (gera muito respingo). Seu potencial de oxidação facilita a estabilidade do arco na raiz, porém parece aumentar a tensão superficial em relação ao meio ambiente, por outro a maior tensão superficial favorece o modo de transferência metálica por curto-circuito, que gera acabamento irregular e oxidado, levando a muitos respingos e fumos (Scotti e Ponomarev, 2014).

- Oxigênio é um gás não utilizado de maneira direta como gás protetor, serve como elemento de misturas com gases a base de Ar. Sua principal qualidade são melhorar a estabilidade do arco (baixo potencial de ionização) e diminuir a tensão superficial que favorece a transferência de gotas pequenas e reduz a quantidade de respingos (Teske, 2006).

De acordo com Lyttle e Stapon (1990) e Jönsson, Murphy e Szekely (1995) a adição de  $\text{O}_2$  e/ou  $\text{CO}_2$  no gás inerte, para a soldagem dos materiais ferrosos pelo processo GMAW, melhora a estabilidade do arco e melhora as características de molhabilidade da poça de fusão, aumentando a sua fluidez, resultando em cordões de solda com menor reforço e maior largura, devido à redução da tensão superficial na interface líquido/sólido, aumentando a qualidade e produtividade na soldagem. A composição química dos arames/eletrodos utilizados para a soldagem dos aços contém grandes quantidades de silício, o qual atua como desoxidante na poça de fusão, gerando um filme líquido de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) na superfície desta. O óxido de silício aumenta a molhabilidade (ângulo de molhamento ( $\theta$ ) pequeno) e a fluidez da poça de fusão por apresentar baixo valor de tensão superficial (0,2 a 0,26 N/m) (Teske, 2006).

A adição de oxigênio puro nos gases convencionais para soldagem GMAW, cria efeito de maior penetração e um cordão mais estreito. Já adição de  $\text{CO}_2$  ao argônio provoca boa penetração, porém um cordão mais largo que usando  $\text{O}_2$  puro. A Figura 2.23 compara os efeitos da adição de oxigênio e  $\text{CO}_2$  ao gás de proteção argônio e o  $\text{CO}_2$  puro (Scotti e Ponomarev, 2014).

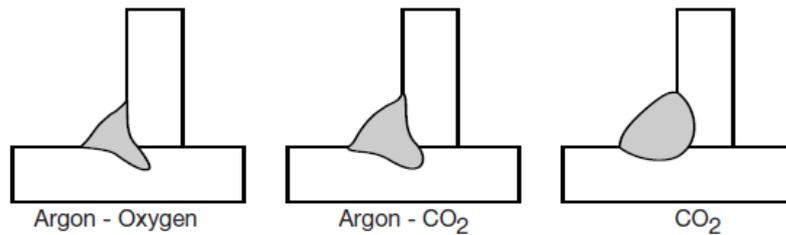


Figura 2.23: Os efeitos da adição de oxigênio e de CO<sub>2</sub> ao argônio e o CO<sub>2</sub> puro (Lincoln Electric Company, 2015 apud Menezes, 2016).

### c) Outros Gases

- Nitrogênio (N<sub>2</sub>) é considerado inerte em baixas temperaturas, contudo, reage com certos materiais (Al, Mg e Ti), se dissolvendo formando soluções e nitretos. Não é utilizado como constituinte principal do gás de proteção (Scotti e Ponomarev, 2008).

A tensão do arco para um dado comprimento de arco é significativamente maior com a proteção de nitrogênio do que com a proteção com argônio ou hélio. O nitrogênio, como outros gases moleculares, favorece, em relação ao argônio, a fusão de metal de base, aumentando a penetração do cordão. O N<sub>2</sub> possui alta entalpia como o H<sub>2</sub>, o que o faz transferir mais calor para a solda, por outro lado, favorece a formação de poros. A figura 2.24 demonstra a variação da entalpia com a temperatura (Tusek e Suban, 2000).

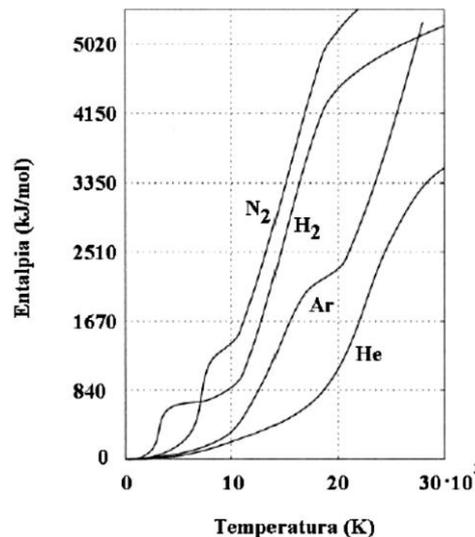


Figura 2.24: Entalpia dos gases em função da temperatura (Tusek e Suban, 2000).

- Hidrogênio é um gás incolor, inodoro, insípido e não tóxico e é mais leve do que o hélio. Ele é um gás redutor e esta característica é benéfica na remoção de filmes de óxidos, permitindo a obtenção de uma superfície de solda mais limpa (Tusek e Suban, 2000).

Entre os gases comumente utilizados, o hidrogênio é um dos que têm maiores valores de condutividade térmica e entalpia, figura 2.25 (Tusek e Suban, 2000).

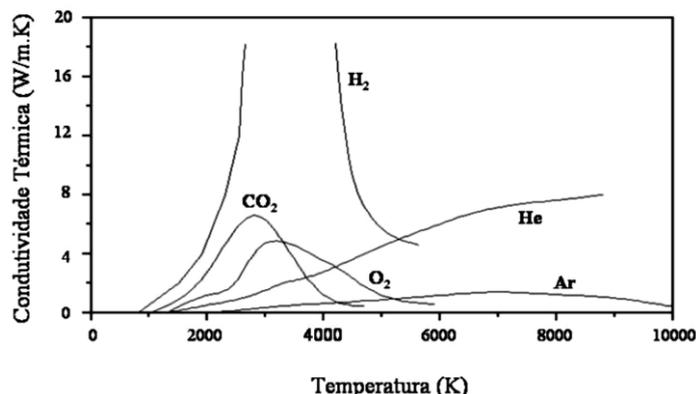


Figura 2.25: Condutividade térmica dos gases em função da temperatura (Tusek e Suban, 2000).

De acordo com Teske (2006), o hidrogênio é o gás que possui o maior valor de calor específico entre os que são utilizados na soldagem com proteção gasosa, além de possuir alta condutividade térmica. Essas condições aumentam a tensão do arco, gerando mais calor e elevando o valor de penetração do cordão.

Tatagiba (2015) em seu estudo comprovou a teoria do modelo oxidante na soldagem do aço carbono pelo processo GMAW por curto-circuito. Ainda, que a adição controlada de  $H_2$  em misturas oxidantes reduz o potencial de oxidação a um nível tal que há a melhora da estabilidade do processo de soldagem.

### 2.3.2 Mistura de Gases de Proteção

No estudo de Tatagiba et al., (2012) foi verificado as principais tendências de gases de proteção utilizadas para a soldagem a arco elétrico, a tabela 2.5 mostra estas formulações e seus resultados.

Tabela 2.5: Formulações de gás de proteção para soldagem a arco elétrico.

Ano	Gás de Proteção	Resultados
1960	Ar/He 1-20%CO <sub>2</sub> /CO	Material: aço carbono (<0,35%C). Obtenção de um cordão de solda muito liso e uniforme. Particularmente quando é adicionado CO <sub>2</sub> a mistura.
1964	Ar e/ou He. 20-70% CO <sub>2</sub> /CO 1-15% O <sub>2</sub>	Material: aço carbono. Formação de uma poça de solda que associa a boa penetração fornecida pelo gás CO <sub>2</sub> com a boa largura de cordão fornecida pelo Ar.

1970	He 40-60%Ar 1-15%CO <sub>2</sub>	Ar 1-15%CO <sub>2</sub> 60-80%He	Material: aço carbono. Possibilidade de realizar soldas em todas as posições, obtendo adequadas propriedades de resistência mecânica e tenacidade.
1986	65-95% He 1,75-2,25%CO <sub>2</sub> 0,25- 1%O <sub>2</sub>		Material: aço carbono. Solda livre de escória e com uma superfície mais limpa.
1989	He 3-8%CO <sub>2</sub> 30-40%Ar		Material: aço carbono. Melhorou a deposição sobre o metal base em virtude de a transferência metálica ser por spray.
1990	Ar 0,5-1,25%CO <sub>2</sub> 30-40%He		Material: aço carbono, aço inoxidável, metais não ferrosos. Produz uma solda com aparência superior a obtida com outras misturas, com aspecto liso e com pouca ou nenhuma oxidação, sem instabilidade do arco. A taxa de transferência metálica é alta.
1991	20-65%Ar 30%CO <sub>2</sub> 5-20%He		Material: aço carbono. Com esta composição do gás de proteção é possível o uso de correntes de até 1000 A, mantendo boa densidade e um formato satisfatório do cordão. Com essas misturas houve baixa formação de respingos e liberação de fumos. A melhor aparência da solda é obtida com correntes maiores que 600 A.
1996	Ar 2-20%O <sub>2</sub>		Material: aço carbono, aço inoxidável. A adição de O <sub>2</sub> aumentou a taxa de transferência metálica, que variou de acordo com a corrente utilizada, promovendo a formação de um cordão de solda de melhor qualidade.
2001	96%Ar 3%CO <sub>2</sub> 1%O <sub>2</sub>		Material: aço carbono, aço inoxidável. Obtém-se transferência metálica por curto-circuito, por spray entre outras. Com esta composição não ocorre alteração significativa da química do metal de solda.
2002	Ar Ar CO <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		Material: aço carbono, aço inoxidável. O arco de soldagem apresenta-se bastante instável. A solda não tem molhabilidade adequada e são produzidas descontinuidades. Material: aço carbono, aço inoxidável. O <sub>2</sub> melhora a fluidez, molhamento e penetração do cordão de solda. Além da estabilização do arco, as adições progressivas contribuem para a perda de

			elementos de liga através do arco. Adições de CO <sub>2</sub> aumentaram as emissões de fumos de soldagem.
2009	97.5%Ar 2.5%CO <sub>2</sub> 90%Ar 10%CO <sub>2</sub>	82%Ar 18%CO <sub>2</sub> 75%Ar 25%CO <sub>2</sub>	Material: aço carbono. Com o aumento da porcentagem de CO <sub>2</sub> no gás de proteção verificou-se o aumento na penetração da solda e a diminuição na quantidade de inclusões.
2009		Ar 1%O <sub>2</sub>	Material: aço carbono. Em condições com baixa corrente o arco elétrico é instável, com transferência metálica globular e grande formação de respingos. Nos períodos de alta corrente, a transferência por spray foi estável, ocorrendo baixa formação de respingos e um arco mais longo. O processo foi instável e após cerca de 3 a 6 s, tornou-se estável. Esta transição foi caracterizada por um aumento no comprimento do arco (de 4 mm) e da corrente (entre 50-100 A).
1988		71-83%Ar 16%-25% He 1-4%CO <sub>2</sub>	Material: aço inoxidável, aços de baixa liga, ligas a base de Ni e metais não ferrosos. Utilizando-se gás de proteção com esta composição a taxa de deposição de metal é aumentada, com a entrada de energia reduzida, na soldagem por arco pulsado, em operações de soldagem fora de posição.
1992		Ar 0,1-0,9%CO <sub>2</sub> 5%-12% He	Material: Super ligas a base de Ni, Co. Capacidade de soldar com uma grande variedade de modos de transferência metálica com a estabilidade do arco excelente, perfil do cordão e a aparência adequada. As características do arco são mantidas de forma a não produzir oxidação excessiva do metal de solda.
2002		Ar 0,01-1,80%O <sub>2</sub> 20-98,2% He	Material: Al e suas ligas. Transferência por spray, sem corrente pulsada. Proporciona uma elevada produtividade devido a velocidades de soldagem de 110 cm/min em corrente contínua e 105 cm/min em corrente alternada. As juntas soldadas apresentam um baixo nível de inclusões de alumina, e adequadas propriedades mecânicas.
2007		Ar 6-10%CO <sub>2</sub> 6-10%He	Material: aço revestido, galvanizado e aço aluminizado. Obteve-se transferência metálica por curto circuito e por spray. Pode ser aplicada com posição de soldagem horizontal ou plana. Promoveu menor quantidade de respingos e

		porosidade. Cordão de solda com melhor aparência.
2010	Ar 20-30%CO <sub>2</sub> 12-15%O <sub>2</sub>	Material: aço galvanizado. Na soldagem de ângulo, de uma folha, usando essa composição do gás de proteção é possível obter uma velocidade de soldagem de até 125 cm/min.

---

Fonte: Adaptado Tatagiba *et al.* (2012).

### 2.3.3 O Propileno

Propeno, nome oficial pela IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada), também conhecido e chamado de propileno, é um hidrocarboneto insaturado de formulação química C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, apresentando-se normalmente como um gás incolor e altamente inflamável.

É produzido durante o craqueamento do petróleo e por gaseificação do carvão. Ele é muito utilizado como uma das maiores matérias-primas da indústria petroquímica.

É definido como um asfixiante simples pois seu principal risco é a capacidade do gás em deslocar o oxigênio do ar, principalmente em locais confinados. É acondicionado na forma liquefeita. Os usos do propileno incluem mistura para gasolina, copolímero de polipropileno, síntese de isopropanol, trímeros e tetrâmeros para detergentes, óxido de propileno, glicerina, em pequena escala como gás para oxi-corte. Seu nome comercial para uso em oxi-corte varia de acordo com a empresa que faz a comercialização: Star flame GC-2 (White Martins) e Thermolene (AGA - The Linde Gas Group) (Mahan e Myers, 2005; White Martins, 2010).

### 2.3.4 Adição de Propileno em Gases de Proteção

(Ribeiro, 2016) em seu estudo de adição do gás combustível propileno em gases de proteção convencional, verificou as porcentagens aceitáveis para efeitos na estabilidade do processo GMAW, abaixo seguem alguns resultados de seu estudo.

- Utilizando os mesmos parâmetros de corrente e tensão, a qualidade das soldas obtidas nas atmosferas Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> pode ser considerada semelhante das obtidas em Ar+25%CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

- Em atmosfera  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,5\%\text{C}_3\text{H}_6$  variou-se a tensão entre 22,2 e 23,1 V, qualitativamente apresentou menos escória do que as em atmosferas  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ . Não foram identificados poros nas soldas, sendo todas aprovadas no ensaio de LP.
- Nas condições estudadas o efeito das adições de propileno nas atmosferas convencionais, utilizadas na soldagem do aço SAE 1020, evidenciam a melhoria da estabilidade do processo GMAW.
- Em atmosferas  $\text{CO}_2+1,5\%\text{C}_3\text{H}_6$  e  $\text{CO}_2+1\%\text{C}_3\text{H}_6$  um corpo de prova foi soldado com tensão próxima a 24 V e o outro a 21,5 V. Netas atmosferas, as soldas evidenciaram bom ajuste dos parâmetros corrente x tensão, apresentando bom aspecto visual do cordão, não sendo perceptível o aumento de escória. Apresentaram bom aspecto do cordão e foram aprovadas no ensaio de LP.
- As adições de propileno nas atmosferas de proteção não provocaram alterações significativas na microestrutura, na composição química e no perfil de dureza do metal de solda.

#### 2.4 ESTABILIDADE DO PROCESSO PARA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

Conseguir alcançar e manter a estabilidade de um processo de soldagem é o objetivo de todos que trabalham com linha de produção (não necessariamente otimizado em relação à produção ou custo), pois ela pode garantir soldas de qualidade (Adolfsson *et al.*, 1999).

Scotti e Ponomarev (2014) de maneira simples definem a estabilidade do processo em mantê-lo funcionando repetitivamente com boa aparência operacional, ou seja, com pouco ruído, respingos e cordões com bom acabamento. Porém para conseguir esse objetivo, dentre tantas variáveis deste processo, que mudam periodicamente (como a qualidade do consumível e desempenho do equipamento de soldagem), e que podem encobrir resultados da estabilidade, mesmo utilizando parâmetros apropriados, é um problema. Um outro problema, seria o modo de quantificar esta estabilidade, de maneira que seja assegurado que a atingiu, para que possa ser acompanhado, caso ocorra alguma alteração da estabilidade.

Ainda segundo estes autores, de maneira geral, a estabilidade do processo GMAW é atingida quando se assegura estabilidade do arco e da transferência metálica ao mesmo tempo.

A determinação da estabilidade do processo de soldagem GMAW, também é avaliada pelo resultado da execução de uma solda, através de níveis aceitáveis de respingos e fumos gerados, ausência de descontinuidades, boa penetração e geometria do cordão de solda. A garantia da estabilidade é feita através de repetição de soldagens com mesma regulagem e acompanhamento dos parâmetros para alterações na regulagem, quando preciso (Scotti e Ponomarev, 2008).

Pode-se dizer que a estabilidade do processo é influenciada pelas propriedades físico-químicas de seus constituintes (gás de proteção e consumíveis), que relacionam o potencial de ionização, o potencial de oxidação, a condutividade térmica, o meio ambiente e pelas características da alimentação do arame (Scotti e Ponomarev, 2008).

No âmbito industrial, um soldador experiente pode avaliar a estabilidade do processo por nível de ruído ou até mesmo pela luminosidade do arco. Estas técnicas empíricas são importantes, já que os ruídos são gerados a partir de perturbações sonoras e refletem modificações no modo de transferência metálica ou do comportamento do arco. A luminosidade também identifica alterações durante a soldagem e pode-se citar alterações no comprimento do arco, dos valores de tensão e corrente de soldagem (Scotti e Ponomarev, 2014).

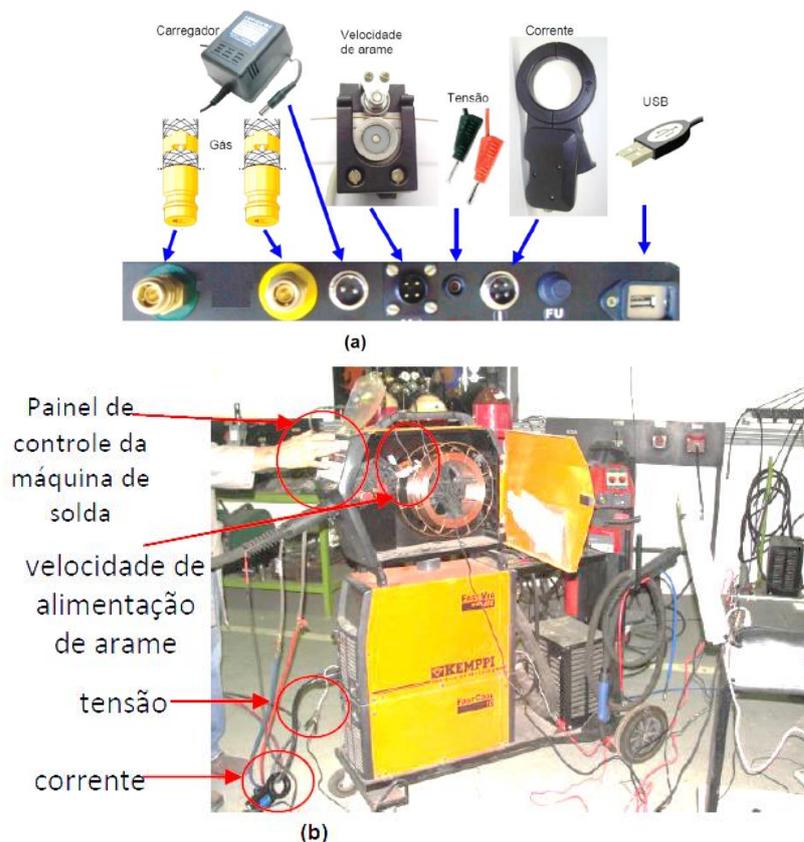
#### 2.4.1 Parâmetros Importantes Analisados para Estabilidade do Processo

Uma solda de qualidade requer regulagem de parâmetros adequados, tais como: tensão e corrente de soldagem, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame-eletrodo, vazão do gás de proteção, DBCP, entre outros. E estes parâmetros devem ser mantidos dentro limites desejados, para não gerar irregularidades na solda (Scotti e Ponomarev 2014).

Dois destes parâmetros possuem maior parte de peculiaridades, - a tensão e a corrente de soldagem que são quem fornecem energia do processo em forma de arco elétricos. E seu comportamento ao longo do tempo deve ser monitorado, através de curvas de tensão e corrente (Scotti e Ponomarev 2014).

### 2.4.1.1 Sinais do Arco Elétrico

Usualmente índices de estabilidade baseiam-se em valores estatísticos dos sinais elétricos. A obtenção dos valores para os cálculos estatísticos, pode ser feito pelo equipamento SAP V4 (figura 2.26). Ele é instalado no equipamento de soldagem e é composto de sensores que medem sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame, vazão do gás e um software para aquisição destes sinais (IMC Soldagem, 2005).



**Figura 2.26: Painel de conexões do sistema SAP V4 (a); SAP V4 acoplado a máquina de solda (b) (Ribeiro, 2016).**

O sistema SAP V4 fornece muitas funções, dentre elas são:

- Leitura instantânea e de valores médios de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás;
- Avaliação da regularidade da transferência metálica através do comportamento dinâmico das variáveis de soldagem;
- Produção de gráfico de corrente em função da tensão;
- Visualização em tempo real das variáveis tensão e corrente, quantidade de arame e gás consumidos, tempo de soldagem e potência consumida.

- e) Geração do gráfico I (corrente) x U (tensão) de soldagem;
- f) Exibição, através do mostrador digital, das variáveis citadas acima além de outras, tais como quantidade de arame e gás consumidos, tempo de soldagem e potência.

Este sistema de aquisição de dados de soldagem realiza a leitura instantânea da corrente, da tensão, velocidade do arame e vazão de gás (Figura 2.27). A partir da leitura desses valores feita por sensores, determina-se índices para avaliação da regularidade de transferência metálica (IMC Soldagem, 2014).

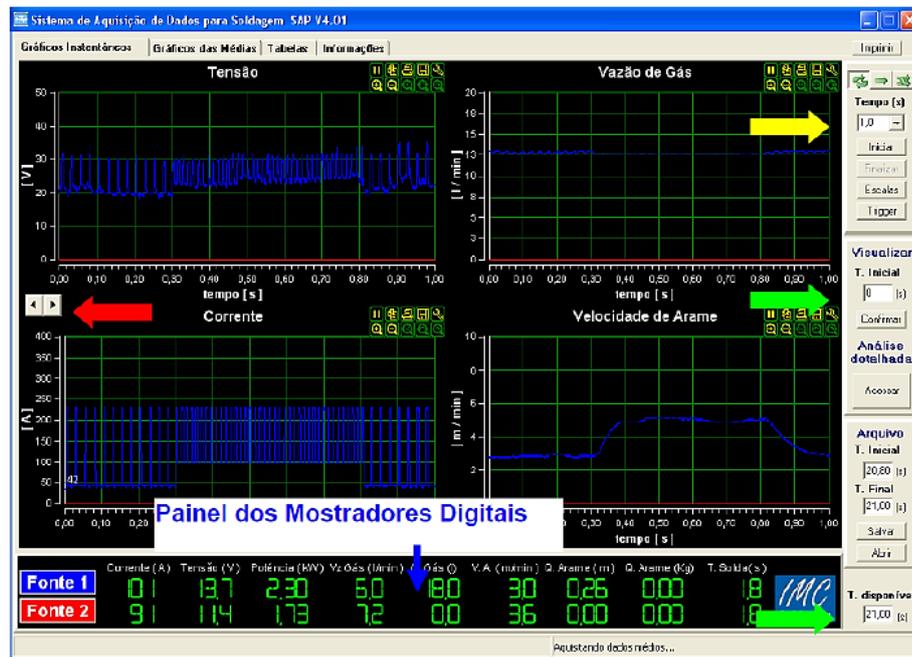


Figura 2.27: Tela de monitoramento instantâneo dos parâmetros de soldagem (IMC Soldagem, 2014).

Além da leitura de instantânea dos parâmetros da figura 2.27. O SAP V4 gera oscilogramas de corrente pelo tempo e tensão pelo tempo. As figuras 2.28 e 2.29 demonstram os oscilogramas de corrente e tensão respectivamente.

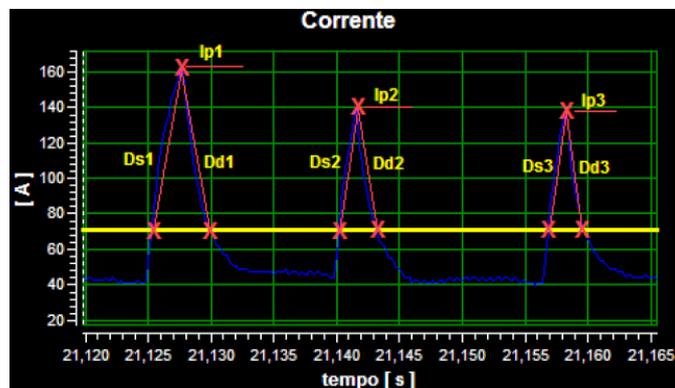


Figura 2.28: Oscilograma de corrente (A) vs tempo (s) na soldagem por curto-circuito (IMC Soldagem, 2014).

Onde,

$I_p$  = picos de corrente;

$D_s$  = derivada de subida;

$D_d$  = derivada de descida.

Os efeitos de subida e descida da corrente são exemplos de índices muito importantes para descrever o comportamento do arco. Pode ser dizer ainda que a taxa de descida é fundamental para determinar a reignição do arco (Ribeiro, 2016).

(Souza, *et al.*, 2011) relata que a indutância do equipamento de soldagem com fontes eletrônicas age de forma a variar as taxas de subidas e descidas da corrente.

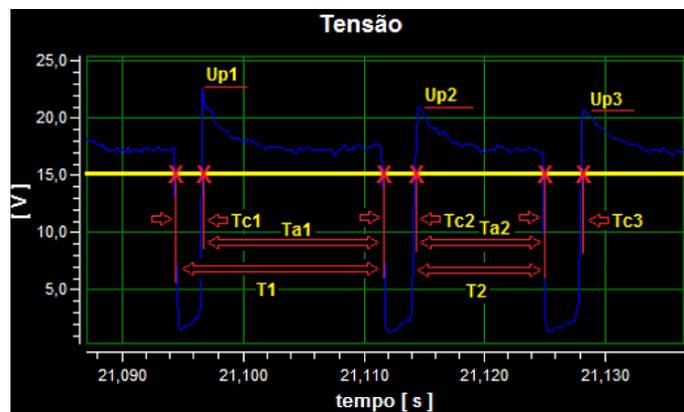


Figura 2.29: Oscilograma de tensão (V) vs tempo (s) na soldagem por curto-circuito (IMC Soldagem, 2014).

Onde,

$U_p$  = picos de tensão;

$T$  = tempo da transferência metálica;

$T_a$  ou  $T_{ab}$  = tempo de arco aberto (tempo para o crescimento da gota metálica fundida na ponta do eletrodo);

$T_c$  ou  $T_{cc}$  = tempo de curto circuito (tempo de transferência da gota fundida para a poça de fusão).

(Scotti e Ponomarev, 2008) mostram que outros índices auxiliares podem ser derivados dos índices de  $T_{ab}$  e  $T_{cc}$  de transferência metálica.

- Período de curto-circuito

$$P_{cc} = T_{ab} + T_{cc} \quad \text{Equação 2.5}$$

- Frequência de curto-circuito

$$F_{cc} = \frac{1}{P_{cc}} \quad \text{Equação 2.6}$$

- Fração do tempo de curto-circuito num ciclo total de transferência

$$K_{cc} = \frac{t_{cc}}{P_{cc}} \quad \text{Equação 2.7}$$

#### 2.4.1.1.1 Análise estatístico dos sinais

A aquisição de sinais instantâneos de tensão e corrente do SAP V4 varia com intervalos de 0,05 a 50 s, sinais médios em períodos de 60 a 3600 s, velocidade do arame e vazão do gás de proteção. A partir dos dados o software elabora gráficos sobrepostos, histogramas e gráfico Tensão X Corrente. Utilizando os histogramas, são calculados índices estatísticos que fazem uma análise geral dos dados adquiridos e servem de indicativo da regularidade da transferência metálica (Tatagiba, 2015). E são definidos por:

- Média aritmética ( $\bar{x}$ ) que é o somatório dos valores medidos de uma variável ( $x_i$ ) dividida pelo número de medidas ( $n$ ), conforme equação 2.8:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação 2.8}$$

- Desvio padrão ( $\sigma$ ) identifica e compara a variabilidade de valores medidos e é calculado pela raiz quadrada dos desvios médios quadráticos das medidas em relação ao seu valor médio (equação 2.9):

$$\sigma = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)^2} \right]} \quad \text{Equação 2.9}$$

- Coeficiente ou taxa de variação ( $K_v$ ) que é calculado pela razão do desvio padrão pela média conforme equação 2.10:

$$K_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad \text{Equação 2.10}$$

A figura 2.30 mostra um resumo estatístico gerado pelo sistema SAP V4.

**Informação Específicas**

Picos de Corrente		Picos de Tensão	
Total Picos	161,0	Total Picos	161,0
Media (A)	129,0	Media (V)	20,3
D. P. (A)	4,7	D. P. (V)	2,1
D. R. (%)	3,7	D. R. (%)	10,3

Período		Período de Arco		Período de Curto Circuito	
Total Trans.	160,0	Total Trans.	159,0	Total Trans.	161,0
Media (ms)	12,4	Media (ms)	11,0	Media (ms)	1,5
D. P. (ms)	3,3	D. P. (ms)	3,2	D. P. (ms)	0,2
D. R. (%)	26,6	D. R. (%)	29,0	D. R. (%)	11,3

Derivada Subida		Derivada Descida	
Total Deriv.	161,0	Total Deriv.	161,0
Media (A/ms)	55,2	Media (A/ms)	27,8
D. P. (A/ms)	3,2	D. P. (A/ms)	3,6
D. R. (%)	5,9	D. R. (%)	12,8

Figura 2.30: Resultados da análise estatística obtidos pelo sistema SAP V4 (IMC Soldagem, 2014).

#### 2.4.2 Índice Vilarinho (IV<sub>cc</sub>)

A Laprosolda (grupo de pesquisa em soldagem da Universidade Federal de Uberlândia) criou um critério para quantificar a estabilidade de transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW, que se baseia na regularidade da transferência (como a gota se destaca, seu volume e diâmetro adequado).

Souza *et al.* (2011) destaca o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV<sub>cc</sub>). Segundo este índice, há relação entre a estabilidade do processo e a constância dos tempos em curto-circuito em arco aberto, proporciona um alto grau de regularidade. Ou seja, se esses tempos sofrem pouca variação, o processo está estável. A regularidade será melhor, quanto menor for o IV<sub>cc</sub>, como mostra a equação 2.11.

$$IV_{CC} = \frac{\sigma_{tcc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{tab}}{t_{ab}} \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde,

$\sigma_{tcc}$  = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito;

$\sigma_{tab}$  = desvio padrão da média do tempo de arco aberto;

$t_{cc}$  = média do tempo de curto-circuito;

$t_{ab}$  = média do tempo de arco aberto.

### 2.4.3 Geração de Respingos

Os respingos gerados na soldagem GMAW, juntamente com a análise estatística é importante parâmetro que pode ser utilizado para medir a estabilidade, principalmente em transferência por curto-circuito. A equação 2.12 mostra como calcular o índice de estabilidade (IE), através da geração de respingos (Tatagiba, 2015).

$$IE = \frac{100}{T \times R} \quad \text{Equação 2.12}$$

Sendo,

T = período de transferência;

R = fator de respingos (definido pelo peso dos respingos + peso do metal de adição).

Souza *et al.* (2011) relata que a geração de respingos é o principal problema da transferência por curto-circuito, que diminui a capacidade de produção, seja devido à perda de material de adição ou à necessidade de dispêndio de recursos para sua retirada.

Souza *et al.* (2011) e Suban e Tusek (2003) destacam que com o aumento muito rápido na corrente no momento do curto-circuito (podendo ser acusado pelo efeito da indutância) causa a ruptura explosiva da parte líquida do arame, provocando o respingo que adere ao equipamento que está sendo soldado.

A transferência por curto-circuito tem características periódicas de arco e curto-circuito entre o arame-eletrodo e a poça de fusão (transferência que é dominada pelo efeito da tensão superficial). A gota de metal cresce na ponta do eletrodo quando o arco é mantido e assim acontece a transferência. Formas de onda irregulares de corrente e tensão indicam variações nos tamanhos dessas gotas e ocasionam um desequilíbrio nas forças que as regem. A geração de respingos é maior quando o tempo de curto-circuito ou tempo de arco é irregular (Kang *et al.*, 2003).

Stenbacka e Persson (1989) alertam que a utilização de mais que 15% de CO<sub>2</sub> no gás de proteção desestabiliza a transferência metálica e aumenta a quantidade de respingos.

## CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os materiais e os métodos utilizados para estudar os efeitos dos quatro gases de proteção testados, no que diz respeito à estabilidade do arco elétrico, as características geométricas dos cordões de solda, a geração de escórias e respingos, bem como a dureza e a microestrutura dos cordões de solda.

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Metal de base (chapas de teste)

Para os experimentos foram utilizados como metal de base 32 chapas de aço carbono SAE 1020 com dimensões de 200 x 50 x 6,35 mm. Este metal de base foi escolhido por apresentar boa soldabilidade e por ser comumente usado na fabricação e construção (Modenesi, 2011). A tabela 3.1 apresenta sua faixa de composição química.

**Tabela 3.1: Faixa de composição química (% em peso) do aço carbono SAE 1020.**

Classificação	Composição Química				
	C	Si	Mn	P	S
SAE 1020	0,18 - 0,23	0,15 - 0,35	0,30 - 0,60	0,03 máx.	0,05 máx.

Fonte: Adaptado de SAE (2001).

#### 3.1.2 Metal de adição

Foi utilizado arame sólido de acordo com a norma AWS A5.18 (2005), classificado como ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm. Os requisitos de composição química do arame são apresentados na tabela 3.2 e os valores apresentados individuais são o máximo permitido para o elemento.

**Tabela 3.2: Requisitos de composição química para arames de aços doces e de baixa liga.**

Classificação	Composição Química					
	C	Mn	Si	S	P	Cu
AWS ER70S-6	0,06 - 0,15	1,40 - 1,85	0,80 - 1,15	0,035	0,025	0,50

Fonte: Adaptado de AWS (2005).

### 3.1.3 Gases de Proteção

De modo a atender esta pesquisa a White Martins preparou e forneceu em cilindros os gases de proteção utilizados. A tabela 3.3 mostra suas respectivas nomenclaturas e composição química.

**Tabela 3.3: Nomenclatura dos gases de proteção e sua composição química.**

Nomenclatura	Composição Química (%)		
	Argônio	CO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
CO <sub>2</sub>	-	100	-
Ar+25%CO <sub>2</sub>	75	25	-
CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	-	98,7	1,3
Ar+25%CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	74,4	25	0,6

Fonte: Especificação contida nas tags do cilindro.

### 3.1.4 Materiais para Preparação Metalográfica

- a) Baquelite em pó para embutimento a quente.
- b) Lixas d'água com granulometria (medido em mesh) de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 respectivamente.
- c) Panos e pastas abrasivas de alumina de granulometria igual a 1µm, 0,3µm e 0,05µm respectivamente.
- d) Solução em Nital.

## 3.2 EQUIPAMENTOS

- a) A fonte utilizada foi um conjunto semi-automático para soldagem GMAW da marca ESAB modelo Smashweld 316 com tensão constante e alimentador de arame embutido, conforme mostra a figura 3.1.



Figura 3.1: Fonte de soldagem GMAW da marca ESAB modelo Smashweld 316.

- b) Um trator de soldagem modelo A2T Multitrac da fabricante ESAB, para deslocamento da tocha de soldagem (velocidade de soldagem) e para manter a DBCP livre de variações, conforme mostra a figura 3.2.

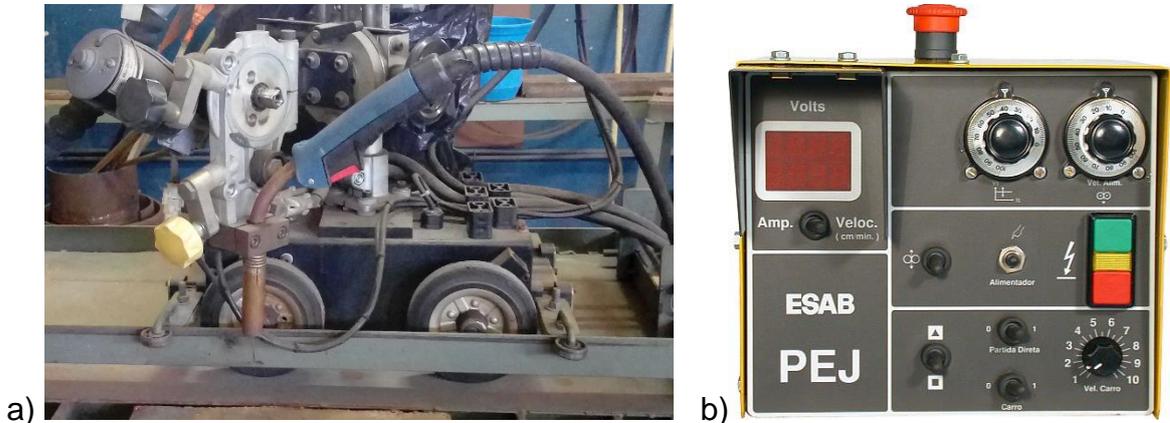


Figura 3.2: a) Trator de soldagem com a tocha acoplada. b) Unidade de controle PEJ para o controle da velocidade de soldagem.

- c) Sistema de aquisição de dados SAP V4 (figura 3.3) do fabricante IMC Soldagem, para o monitoramento dos sinais elétricos.



Figura 3.3: Sistema de aquisição de dados (IMC Soldagem, 2014)

### 3.2.1 Equipamentos e ferramentas auxiliares

- Coletor de escória e respingo.
- Picadeira com mola para remoção da escória.
- Escova de aço para limpeza do cordão de solda.
- Esmerilhadeira manual.
- Disco Flap para remoção da carepa
- Balança de precisão com precisão de 0,1 g.
- Balança de precisão com precisão de 0,001 g.

- h) Máquina de corte Mesotom da marca Struers-Panambra com refrigeração a água contendo óleo solúvel.
- i) Equipamento de embutimento automático.
- j) Lixadeira semi-automática Struers-Panambra DP-10.
- k) Máquina de polimento semi-automática da marca Arotec.
- l) Microscópio ótico Olympus com aumento que varia de 50x a 500x
- m) Microscópio ótico Olympus com aumento que varia de 50x a 1000x.
- n) Microdurômetro Shimadzu HMV-2T na escala Vickers (HV).
- o) Paquímetro da marca Mitutoyo de resolução 0,05 mm.
- p) Relógio comparador da marca Mitutoyo de resolução 0,01 mm.
- q) Máquina fotográfica digital da marca NIKON modelo D5100.

### 3.3 METODOLOGIA

A realização do trabalho experimental para verificar a influência da adição do gás propileno no processo GMAW, foi feita em três etapas, descritas abaixo.

#### 3.3.1 Etapa I

O objetivo desta etapa foi definir a tensão de soldagem que promovesse uma adequada estabilidade do arco elétrico para cada gás de proteção.

##### 3.3.1.1 Preparação das chapas de teste

As chapas de teste (CT) de aço carbono SAE 1020 foram cortadas nas dimensões 200 x 50 x 6,35 mm com o auxílio de uma serra elétrica e depois foram retirados as rebarbas do corte, os resíduos de óleo e outras sujeiras.

Posteriormente a carepa (óxido de ferro na superfície do aço) foi removida da superfície das chapas de teste com auxílio de uma esmerilhadeira manual e disco Flap. Antes do início da soldagem, as chapas de teste foram limpas com uma escova rotativa e lavadas com acetona para a remoção de eventuais contaminantes existentes.

### 3.3.1.2 Soldagem

Com intuito de encontrar parâmetros de soldagem adequados para cada gás utilizado, foram depositados cordões de solda sobre as chapas variando a tensão. Durante as soldagens os parâmetros mostrados na tabela 3.4 foram mantidos fixos em todas as etapas do trabalho.

**Tabela 3.4: Parâmetros de soldagem fixos utilizados durante os ensaios.**

<b>Parâmetros de Soldagem Fixos</b>	
Ângulo da tocha	90°
Velocidade de soldagem	300 mm/min
DBCP	12 mm
Vazão do gás	15 l/min
Posição de soldagem	Plana

O processo GMAW foi operado no modo convencional. Logo, variando a velocidade de alimentação do arame ( $V_{\text{alim}}$ ) na fonte de energia para uma determinada tensão, o valor médio da corrente de soldagem também variava.

Como a geometria do cordão de solda sofre forte influência da corrente de soldagem e do comprimento do arco, tentou-se manter estes parâmetros o mais estáveis possível.

Ribeiro (2016) utilizou para os mesmos gases de proteção  $V_{\text{alim}}$  entre 4,5 m/min. e 5,0 m/min. Neste trabalho optou-se em utilizar a  $V_{\text{alim}}$  de 5,0 m/min. Deste modo foi realizado soldagens fixando a  $V_{\text{alim}}$  em 5,0 m/min. e variando a tensão entre 18 a 23 V para cada gás de proteção.

### 3.3.1.3 Inspeção qualitativa

Durante e após a soldagem das chapas de teste, foram observados de modo qualitativo a geração de escórias, respingos e ruídos. Em seguida, com as chapas escovadas, foi realizada a inspeção visual, com o objetivo de verificar a presença de descontinuidades superficiais, a aparência e a geometria do cordão de solda.

### 3.3.1.4 Aquisição e avaliação dos sinais elétricos para análise da estabilidade do arco

Ao longo dos testes o sistema de aquisição de dados SAP V4 que estava acoplado a máquina de solda (figura 3.4) coletou os sinais elétricos de tensão e corrente,  $V_{alim}$  e vazão do gás para cada cordão de solda realizado.

Os dados foram colhidos a cada 0,2 s, de um tempo total de soldagem estimado em 45 s para cada cordão de solda. Por haver uma variação de sinais elétricos no início e término da soldagem, a captação de dados foi realizada entre os intervalos de 10 a 35 s. Por meio da leitura instantânea dos sinais elétricos da tensão e corrente foram obtidos os seguintes índices de estabilidade:

- a) Desvio padrão de picos de corrente (DPPC);
- b) Desvio padrão do período de arco aberto (DPAA);
- c) Desvio padrão do período de curto circuito (DPCC).

Os valores dos índices DPPC, DPAA e DPCC encontrados para cada tensão de soldagem testada foram comparados em relação ao gás de proteção utilizado. E o critério empregado para a análise foi de quanto menor o valor do índice avaliado melhor a estabilidade do processo.



Figura 3.4: Equipamento SAP V4 acoplado a fonte de energia.

### 3.3.2 Etapa II

O objetivo desta etapa é analisar e comparar a estabilidade do processo GMAW nas soldas feitas com gases de proteção convencionais dos gases com

adição de  $C_3H_6$ , utilizando os parâmetros que apresentaram uma adequada estabilidade na etapa anterior.

Nesta etapa, a avaliação da estabilidade do processo GMAW foi complementada com os seguintes ensaios:

- Ensaio por líquido penetrante;
- Avaliação da geometria do cordão de solda;
- Avaliação da quantidade de respingos e escória gerados;
- Taxa de deposição.

### 3.3.2.1 Soldagem

A preparação das chapas seguiu o mesmo procedimento da etapa I. E o equipamento de soldagem foi regulado conforme a tabela 3.4 e 3.5. Em seguida foi executada a soldagem depositando um cordão de solda sobre cada chapa.

Para cada gás de proteção foram realizados oito cordões de solda utilizando o mesmo parâmetro de soldagem.

**Tabela 3.5: Valores médios de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame durante a soldagem.**

Gás de Proteção	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de alimentação do arame (m/min.)
Ar+25%CO <sub>2</sub>	19	223	5,0
Ar+25%CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	20	229	5,0
CO <sub>2</sub>	21	224	5,0
CO <sub>2</sub> +1,3% C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	21	228	5,0

### 3.3.2.2 Elaboração e confecção do coletor de respingos

Para avaliar a geração de escória e respingo foi necessário a confecção de um coletor. O mesmo foi elaborado para se adequar ao espaço físico do equipamento de soldagem e para reter os respingos gerados durante a soldagem. Tatagiba (2015) e Menezes (2016) utilizaram um coletor em forma de coifa, no entanto relataram que parte dos respingos caíram fora do coletor. Uma representação do modelo utilizado pelos autores pode ser vista na figura 3.5.

Assim foi elaborado um coletor menor, com tampa e que permitia livre deslocamento da tocha. No item 4.2.1 será mostrado e comentado os resultados apresentados pelo coletor.



Figura 3.5: Coletor de respingos (Ribeiro, 2016).

### 3.3.2.3 Inspeção visual e líquido penetrante

Após a soldagem foram observadas possíveis descontinuidades e a geração de escórias e respingos. Em seguida com as chapas escovadas e com iluminação apropriada foi realizada a inspeção visual, com o objetivo de verificar a aparência e a presença de descontinuidades superficiais, de acordo com a norma PR-050 (ABENDI, 2011), e registradas por fotografia.

Posteriormente foi feito o ensaio de líquido penetrante (LP) para evidenciar possíveis descontinuidades superficiais que não foram possíveis de detectar com a inspeção visual.

### 3.3.2.4 Aquisição e avaliação dos sinais elétricos para análise da estabilidade do arco

A obtenção dos sinais elétricos e os índices utilizados para avaliar a estabilidade do arco elétrico foram os mesmos empregados na etapa I (DPPC, DPAA e DPCC), adicionado do Índice de Vilarinho (explicado no item 2.4.2) que se baseia na regularidade da transferência metálica. Os valores dos índices calculados foram utilizados para comparar a estabilidade do arco obtido com os gases convencionais dos gases com a adição de  $C_3H_6$ .

### 3.3.2.5 Característica da geometria do cordão de solda

Foram preparadas duas macrografias com as soldas realizadas para cada gás de proteção. Para tanto, as soldas foram seccionadas transversalmente na metade do comprimento do cordão utilizando a máquina de corte Mesotom e submetidas a preparação metalográfica usando lixas de 100 a 600 mesh, sendo a seguir atacadas com solução de Nital 3%. Por fim, a seção transversal do cordão de solda foi registrada por fotografia.

A penetração e a largura foram medidas com auxílio de um paquímetro e o reforço com um relógio comparador, conforme a figura 3.6. O índice de convexidade (IC) foi calculado conforme a equação 3.1.

$$IC = \frac{R}{L} \times 100 (\%) \quad \text{Equação 3.1}$$

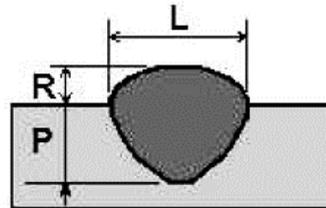


Figura 3.6: Parâmetros geométricos do cordão de solda (adaptado de Silva e Scotti, 2002).

### 3.3.2.6 Avaliação da quantidade de escória e respingos produzidos nas soldas

Ao término da soldagem das oito chapas de cada gás, as escórias e respingos aderidos na chapa (figura 3.7), no bocal da tocha e no coletor, foram recolhidos e armazenados. Posteriormente as escórias foram separadas dos respingos com a utilização de imã e pinça. Justifica-se a necessidade de oito cordões de solda para cada gás de proteção para que fosse possível juntar e pesar a quantidade de escória e respingo gerada numa balança eletrônica de precisão com 0,001g e analisada de forma comparativa entre os gases em estudo.



Figura 3.7: Respingos e escórias retidos na chapa e no cordão de solda.

A razão entre a quantidade de escória gerada ( $Q_{esc}$ ) e a soma dos tempos de soldagem dos oito corpos de prova de cada gás ( $\sum TS$ ) determina a taxa de escória ( $T_{esc}$ ), conforme a equação 3.2. O mesmo pode ser feito para o cálculo da taxa de respingo ( $T_{res}$ ) como mostra a equação 3.3.

$$T_{esc} = \frac{Q_{esc} (g)}{\sum TS (s)} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$T_{res} = \frac{Q_{res} (g)}{\sum TS (s)} \quad \text{Equação 3.3}$$

$Q_{res}$  = Quantidade de respingo.

### 3.3.2.7 Taxa de deposição

Antes da soldagem, as chapas de testes foram limpas e pesadas. Após a soldagem, as chapas foram novamente limpas e pesadas em uma balança de resolução de 0,1 g. A partir destes valores determinou-se a quantidade de metal depositado pela diferença dos pesos da chapa antes e após a soldagem. Assim, torna-se possível o cálculo da taxa de deposição ( $T_d$ ) para analisar a influência dos gases de proteção.

A taxa de deposição pode ser calculada de acordo com a equação 3.4, que é a razão entre a quantidade de metal depositado (kg) e o tempo gasto soldando a chapa (h). Expressando o resultado da Taxa de desposição em kg/h.

$$T_d = \frac{\text{Quantidade de Metal Depositado}}{\text{tempo gasto soldando a chapa}} \quad \text{Equação 3.4}$$

### 3.3.3 Etapa III

O objetivo desta etapa foi avaliar se a adição do gás  $C_3H_6$  nos gases convencionais causou influencia na microestrutura e na dureza do metal de solda.

#### 3.3.3.1 Análise da microestrutura no metal de solda

Para analisar e registrar os constituintes do metal de solda foi feita a preparação metalográfica de duas amostras conforme estão descritas abaixo.

- i. Corte: a chapa teste foi seccionada transversalmente na metade do comprimento utilizando a máquina de corte Mesotom.
- ii. Embutimento: na embutidora, a amostra foi recoberta com baquelite em pó e aplicado uma carga de 150 kg durante 15 minutos a uma temperatura aproximada de 150°C.
- iii. Lixamento: a seção transversal foi preparada na lixadeira semi-automática utilizando lixas de granulometria de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, respectivamente. A cada troca da lixa a direção de lixamento foi mudado em 90° para eliminar o histórico dos riscos da lixa anterior.

- iv. Polimento: Foi realizado na politriz semi-automática com pasta abrasiva de alumina com granulometria de 1  $\mu\text{m}$ . E manualmente para as pastas de 0,3  $\mu\text{m}$  e 0,05  $\mu\text{m}$ , até que a superfície estivesse sem riscos.
- v. Ataque químico: Foi realizado com solução de Nital 3%, por aproximadamente um período 3 s.

Na identificação dos constituintes presentes foi utilizado o sistema de classificação para os constituintes do metal de solda segundo orientações de Perdigão (1987). A tabela 3.6 mostra como os constituintes mais comuns da zona fundida são classificados.

**Tabela 3.6: Microestruturas principais do metal de solda.**

Constituinte	Código
Ferrita de Contorno de Grão	PF(G)
Ferrita Poligonal Intragranular	PF(I)
Ferrita Acicular	AF
Ferrita com Segunda Fase Alinhada	FS(A)
Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada	FS(NA)
Agregado Ferrita-Carbeto	FC
Martensita	M

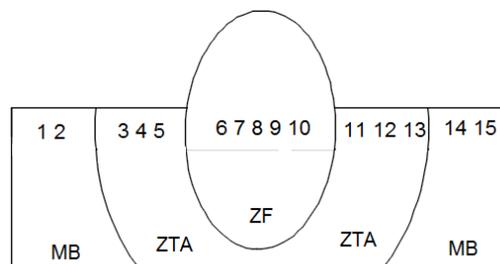
Fonte: Adaptado de Perdigão (1987).

### 3.3.3.2 Dureza Vickers

As amostras utilizadas na metalografia também foram usadas para medir a dureza Vickers dos cordões de solda para cada gás testado.

A medição foi feita por meio de um microdurômetro com uma carga de 100 g e tempo de aplicação de carga de 12 s.

Foram feitas 15 medições de dureza, como mostrado na Figura 3.8, sendo quatro medidas no metal de base (MB), seis medidas na zona termicamente afetada (ZTA) e cinco medições na zona fundida (ZF).



**Figura 3.8: Localização dos pontos onde serão realizadas as medidas de dureza Vickers (adaptado Menezes, 2016).**

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos. Será dado ênfase à influência da adição do gás propileno nos gases de proteção convencionais, quanto a estabilidade do processo GMAW.

### 4.1 Etapa I

O objetivo desta etapa foi determinar o valor da tensão que proporcione uma adequada estabilidade do arco elétrico para cada um dos gases de proteção testados.

#### 4.1.1 Soldagem

A tabela 4.1 mostra as soldas executadas para os quatro gases de proteção, onde foi utilizado uma  $V_{alim}$  de 5,0m/min variando a tensão entre 18 e 23 V.

**Tabela 4.1: Soldas realizadas para os quatro gases variando a tensão em função da  $V_{alim}$  de 5,0 m/min.**

Gás de proteção	Tensão (V)	Cordão de solda
Ar+25%CO <sub>2</sub>	18	
	19	
	20	
	21	
Ar+25%CO <sub>2</sub> + 0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	18	
	19	
	20	
	21	
	22	
CO <sub>2</sub>	19	
	20	
	21	
	22	
CO <sub>2</sub> + 1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	20	
	21	
	22	

De uma forma geral, foi observado uma pequena variação da corrente de soldagem mantendo constância do comprimento do arco elétrico. Vale ressaltar que o comprimento do arco em conjunto com a corrente de soldagem são os dois parâmetros mais importantes do processo GMAW, por serem responsáveis pela intensidade e concentração do calor transferida para chapa (Scotti e Ponomarev, 2014). Também foi verificado que para a  $V_{alim}$  de 5,0 m/min os cordões de solda apresentaram boa geometria e aparência.

Utilizar a  $V_{alim}$  de 5,0 m/min possibilitou trabalhar com tensões baixas e correntes altas, o que é um dos requisitos básicos do processo GMAW. (Scotti e Ponomarev, 2014).

#### 4.1.2 Avaliação Qualitativa

A seguir serão comentados a avaliação qualitativa dos cordões de solda mostrados na tabela 4.1.

##### **a) Ar+25%CO<sub>2</sub>**

As tensões de 18 e 19 V apresentaram cordões de solda com bom aspecto e conformidade, porém na tensão de 18 V o cordão se apresentou um pouco mais estreito e mais alto. Para estas tensões, foi observada uma menor geração de respingos e ruídos mais uniforme em relação às tensões mais elevadas.

Para a tensão de 20 V a solda apresentou conformidade. No entanto ficou mais largo e baixo do que nas tensões de 18 e 19 V. Notou-se um ligeiro aumento da geração de respingos e maior oscilação dos ruídos.

A partir da tensão de 21 V foi observado que o cordão de solda ficou muito largo e baixo. Também foi verificado que a geração e o tamanho dos respingos aumentaram. Desta forma foi considerado acima da faixa de trabalho.

A avaliação qualitativa das soldas com gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> mostrou que para as tensões de 18 e 19 V foram obtidos os melhores resultados.

**b) Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>**

Para as tensões de 20 e 21 V foi observado um cordão de solda com aspecto brilhante e um acabamento superficial uniforme ao longo do cordão. Apresentou baixa geração de respingos e o ruído teve baixa oscilação.

As soldas executadas com tensão de 18 e 19 V apresentaram cordões de solda estreito e alto. Também apresentou maior geração de respingo e aumento de ruído em relação às tensões mais elevadas.

As tensões de 22 e 23 V apresentaram cordões irregulares, sendo largo e baixo. Foi verificada maior geração de respingos e maior geração de ruído em relação as tensões de 20 e 21 V. Por essa razão foram considerados acima da faixa de trabalho da estabilidade do processo.

A avaliação qualitativa para o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> mostrou que foram obtidos os melhores resultados para as tensões de 20 e 21 V.

**c) CO<sub>2</sub>**

Para as tensões de 20, 21 e 22 V as soldas apresentaram aspecto brilhante e boa uniformidade ao longo dos cordões. Entretanto, para a tensão de 20 V o cordão se mostrou mais estreito e alto; já na tensão de 22 V o cordão ficou mais largo e baixo. A geração de respingos diminuiu em relação às outras tensões (19 e 23 V) e os ruídos apresentaram certa uniformidade.

A solda com 18 V mostrou-se muito instável, e foi descartada. Na solda com tensão de 19 V foi observado que o cordão ficou estreito e alto. Apresentou alta geração de respingo e o ruído se mostrou não uniforme em relação as tensões de 20, 21 e 22 V. Assim, foi considerado abaixo da faixa de trabalho.

A tensão de 23 V apresentou cordões de solda não uniformes e foi considerado instável para o processo.

A avaliação qualitativa das soldas com gás de proteção CO<sub>2</sub> mostrou que para as tensões de 20, 21 e 22 V foram obtidos os melhores resultados.

**d) CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>**

Com a tensão de 21 V as soldas apresentaram conformidade, bom aspecto e acabamento. Foi verificado menor geração de respingos e ruído com baixa uniformidade em relação as outras tensões (20, 22 e 23 V).

As soldas com 18 V e 19 V mostraram-se muito instáveis, e foram descartadas. Na solda com tensão de 20 V foi verificado um cordão de solda uniforme, porém ligeiramente mais estreitos do que os cordões feitos na tensão de 21 V. Apresentou aumento na geração de respingos e ruído não uniforme.

As tensões de 22 e 23 V resultaram em soldas não uniformes, aumento na geração de respingos e ruído excessivo, sendo avaliado acima da faixa de estabilidade do processo.

A avaliação qualitativa para o gás de proteção CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> mostrou que foram obtidos os melhores resultados para a tensão de 21 V.

Para os quatro gases de proteção, visualmente não foi observado diferença significativa na geração de escória, por isso foi desconsiderada e não comentada nas observações acima.

Ao avaliar qualitativamente os cordões de solda para os quatro gases de proteção, foi possível observar que:

- Soldas mais estreitas e com maior reforço foram obtidas para as menores tensões. Por outro lado, os cordões de solda se tornaram mais largo e baixo à medida que a tensão aumentava para uma mesma  $V_{alim}$ . Isto foi atribuído ao comprimento do arco elétrico que diminui com o aumento da tensão e está de acordo com as literaturas Liskevich (2010) e Santos (2018).

- As seguintes faixas de tensão proporcionaram cordões de solda com adequado comportamento:

- ✓ Ar+25%CO<sub>2</sub> tensões de 18 e 19 V;
- ✓ Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> tensão de 20 V;
- ✓ CO<sub>2</sub> tensões de 20, 21 e 22 V;
- ✓ CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> tensão de 21 V.

#### 4.1.3 Avaliação dos sinais elétricos para análise da estabilidade do arco elétrico

Na tabela 4.2 são apresentados os valores dos índices DPPC, DPAA e DPCC calculados para avaliar a estabilidade do arco elétrico. A seguir, estes índices serão comentados para cada gás de proteção. É importante salientar que quanto menor o valor do índice melhor é a estabilidade do processo.

**Tabela 4.2: Valores obtidos das soldas da primeira etapa para os quatro gases de proteção.**

Gás de proteção	Tensão (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)
Ar+25%CO <sub>2</sub>	18	49,6	3,6	0,9
	<b>19</b>	<b>45,3</b>	<b>2,3</b>	<b>0,8</b>
	20	66,3	4,3	1,1
	21	78,0	5,1	1,0
Ar+25%CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	18	75,2	4,0	1,3
	19	71,1	4,0	1,2
	<b>20</b>	<b>62,25</b>	<b>3,2</b>	<b>1</b>
	21	64,3	3,1	1
	22	84,7	4,2	1,8
CO <sub>2</sub>	23	89,4	4,3	2,1
	19	69,1	3,0	1,4
	20	65,2	2,4	1,3
	<b>21</b>	<b>64</b>	<b>2,3</b>	<b>1,3</b>
	22	64,8	2,3	1,3
CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	23	74,5	3,5	2,0
	20	64,0	2,5	1,4
	<b>21</b>	<b>61,8</b>	<b>2,2</b>	<b>1,4</b>
	22	73,2	2,8	1,4
	23	86,2	2,9	1,9

##### a) Ar+25%CO<sub>2</sub>

A figura 4.1 mostra a variação dos índices de estabilidade em função da alteração da tensão entre os valores de 18 a 21 V.

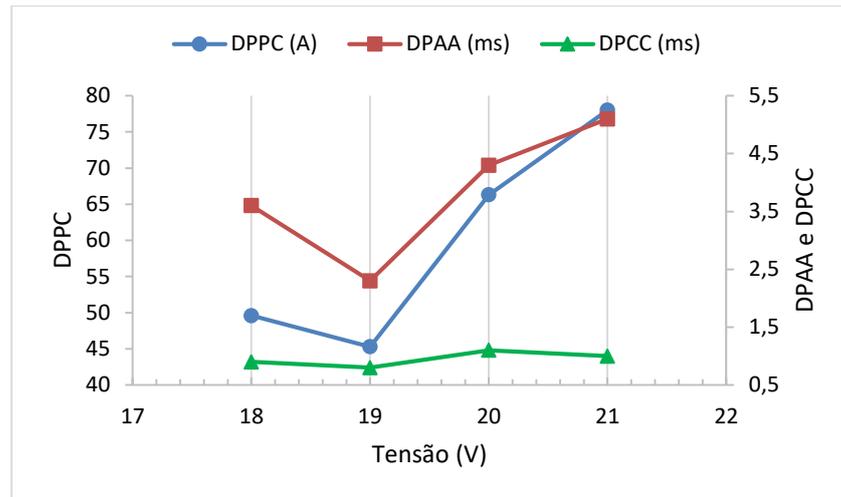


Figura 4.1: Variação dos índices DPPC, DPAA e DPCC em função da tensão de soldagem para o gás Ar+25%CO<sub>2</sub>.

As tensões de 18 e 19 V apresentaram os menores valores dos índices, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa. Também foi observado menor valor dos índices para tensão de 19 V.

Para as tensões de 20 e 21 V foi verificado aumento do valor dos índices, saindo da faixa operacional do processo. Este foi o motivo de não realizar soldas com as tensões de 22 e 23 V.

Analizados os resultados da avaliação qualitativa e dos índices de estabilidade do processo, optou-se em utilizar a tensão de 19 V para a mistura Ar+25%CO<sub>2</sub> na etapa II.

#### b) Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

A figura 4.2 mostra a variação dos índices de estabilidade em função da alteração da tensão entre os valores de 18 a 23 V.

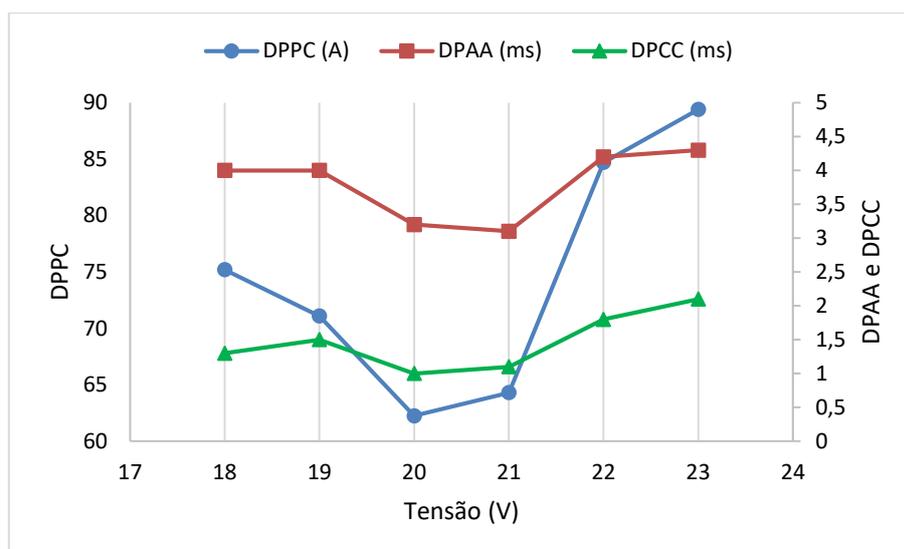


Figura 4.2: Variação dos índices DPPC, DPAA e DPCC em função da tensão de soldagem para o gás Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.

Para as tensões de 20 e 21 V foi verificado menores valores dos índices. Pode ser observado bom comportamento do processo e menores valores de DPPC e DPCC para a tensão de 20 V. Estes resultados podem ser confirmados pela avaliação qualitativa que apresentaram os melhores resultados nestas tensões.

As tensões de 18, 19, 22 e 23 V apresentaram valores mais elevados para os três índices de estabilidade, sendo consideradas abaixo (18 e 19 V) e acima (22 e 23 V) da faixa de trabalho do processo.

De uma forma geral, os resultados dos índices de estabilidade aqui apresentados estão de acordo com os resultados da avaliação qualitativa mostrados no item 4.1.2b. Sendo assim, a tensão de 20 V se mostrou mais adequada e foi escolhida para ser usada na etapa II.

### c) CO<sub>2</sub>

A figura 4.3 mostra a variação dos índices de estabilidade em função da alteração da tensão entre os valores de 19 a 23 V.

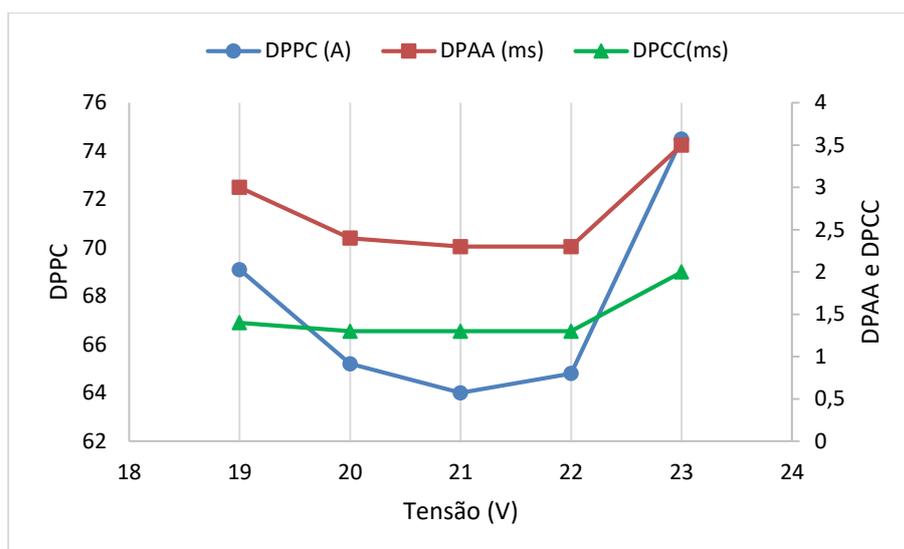


Figura 4.3: Variação dos índices DPPC, DPAA e DPCC em função da tensão de soldagem para o gás CO<sub>2</sub>.

Para as tensões de 20, 21 e 22 V foi verificado os menores valores dos índices. Também foi observado que aumentar a tensão de 20 V para 21 V os valores de DPPC e DPAA diminuíram. Porém elevar a tensão para 22 V resultou no aumento do DPPC.

A tensão de 19 V apresentou valores de DPPC e DPAA elevados, mostrando que este valor de tensão está abaixo da faixa de estabilidade do processo. O que justifica não ter sido feito soldas para a tensão de 18 V.

A tensão de 23 V apresentou um valor elevado para os três índices, sendo considerado acima da faixa de estabilidade do arco elétrico.

De uma forma geral, os resultados dos índices de estabilidade do processo aqui apresentados estão de acordo com os resultados da avaliação qualitativa mostrados no item 4.1.2c. Deste modo, foi selecionado a tensão de 21 V para ser usada na etapa II.

#### d) CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

A figura 4.4 mostra a variação dos índices de estabilidade em função da alteração da tensão entre os valores de 20 a 23 V.

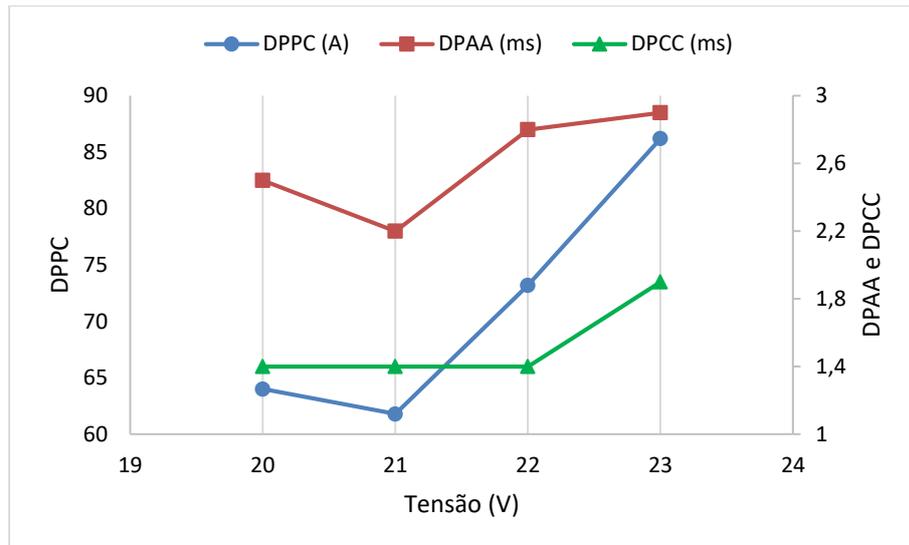


Figura 4.4: Variação dos índices DPPC, DPAA e DPCC em função da tensão de soldagem para o gás  $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ .

Com as tensões de 20 e 21 V foi verificado os menores índices de estabilidade. Este resultado de acordo com os resultados da avaliação qualitativa. A tensão de 21 V apresentou arco elétrico com bom comportamento e menores valores do DPPC e DPAA.

Para as tensões de 22 e 23 V os índices apresentaram elevado aumento, mostrando que estas tensões estão acima da faixa operacional de estabilidade do arco elétrico.

Os resultados encontrados mostram que a tensão de 21 V apresentou melhores condições de trabalho, como já havia sido identificado pela avaliação qualitativa. Desta forma, a tensão de 21 V foi escolhida para a etapa II.

Ao avaliar os índices de estabilidade DPPC, DPAA e DPCC para os quatro gases de proteção, foi possível observar que:

- O processo GMAW possui baixa flexibilidade operacional, tendo um pequeno intervalo de tensão no qual funciona com adequada estabilidade, estando de acordo com (Rezende et al.,2011; Modenesi, 2012; Santos, 2018).

- A faixa operacional se mostrou com variação máxima de 2 V para o gás  $\text{CO}_2$  (20, 21 e 22 V). E apenas 1 V para os gases  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$  (18 e 19 V),  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$  (20 e 21 V) e  $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$  (20 e 21 V).

- Ainda foi observado que a adição do  $\text{C}_3\text{H}_6$  e/ou aumentar a concentração de  $\text{CO}_2$  demandou maiores valores de tensão para uma adequada estabilidade do processo. Suban e Tusek (2001) relataram que gases moleculares de dois ou mais

átomos necessitam de maior tensão de arco para que seus componentes possam se dissociar antes de serem ionizados.

#### 4.1.4 Considerações finais

A execução das soldas alterando o valor da tensão para uma  $V_{alim}$  de 5,0 m/min, possibilitou encontrar faixas estáveis de trabalho para os quatro gases de proteção.

Foi constatado para os quatro gases de proteção que os parâmetros selecionados obtiveram soldas com arco elétrico estável e com qualidade dos cordões de solda.

A decisão de utilizar a  $V_{alim}$  de 5,0 m/min propiciou um arco elétrico curto, obtendo uma corrente de soldagem estável.

Para os quatro gases de proteção à faixa de corrente de soldagem ficaram entre 223 a 230 A e a tensão entre 19 a 21 V, o que mostra que ocorreu baixa alteração da corrente de soldagem em relação os gases em estudo.

No caso do gás  $Ar+25\%CO_2$ , a adição do propileno demandou o aumento de 1 V na tensão para obter uma adequada estabilidade. No caso do  $CO_2$ , adição de propileno não demandou alteração da tensão para se obter uma adequada estabilidade.

A avaliação qualitativa e os índices estabilidade DPPC, DPAA e DPCC, confirmaram um valor de tensão mais adequado para estabilidade do arco elétrico de acordo com o gás de proteção utilizado.

Tanto a avaliação qualitativa quanto os índices de estabilidade medidos indicaram os mesmos valores de tensão para uma melhor estabilidade do processo.

- Como conclusão da etapa I, o valor de tensão que proporcionou cordões de solda com adequado comportamento foram:

- ✓  $Ar+25\%CO_2$  tensão de 19 V;
- ✓  $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$  tensão de 20 V;
- ✓  $CO_2$  tensão de 21 V;
- ✓  $CO_2+1,3\%C_3H_6$  tensão de 21 V.

## 4.2 Etapa II

Uma vez encontrado os parâmetros de soldagem adequados a cada um dos gases utilizados, o objetivo desta etapa foi analisar o efeito da adição de propileno na estabilidade do processo GMAW.

### 4.2.1 Elaboração e confecção do coletor de respingos

A figura 4.5 mostra como ficou o coletor de respingo. No modelo elaborado a tocha não foi envolvida pelo coletor, permitindo a visualização do deslocamento da tocha. O coletor se mostrou eficaz na captação de respingos e ao mesmo tempo não interferiu na realização das soldas. Não foram observados respingos caindo fora do coletor. Kang et al. (2003) utilizaram um coletor que envolvia por completo a tocha e o corpo de prova, de modo a garantir que os respingos fossem coletados.

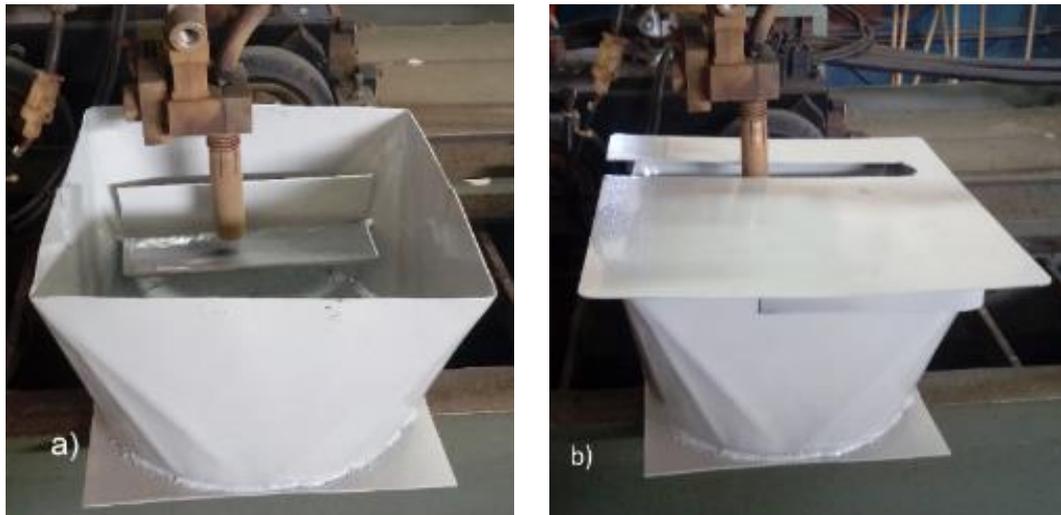


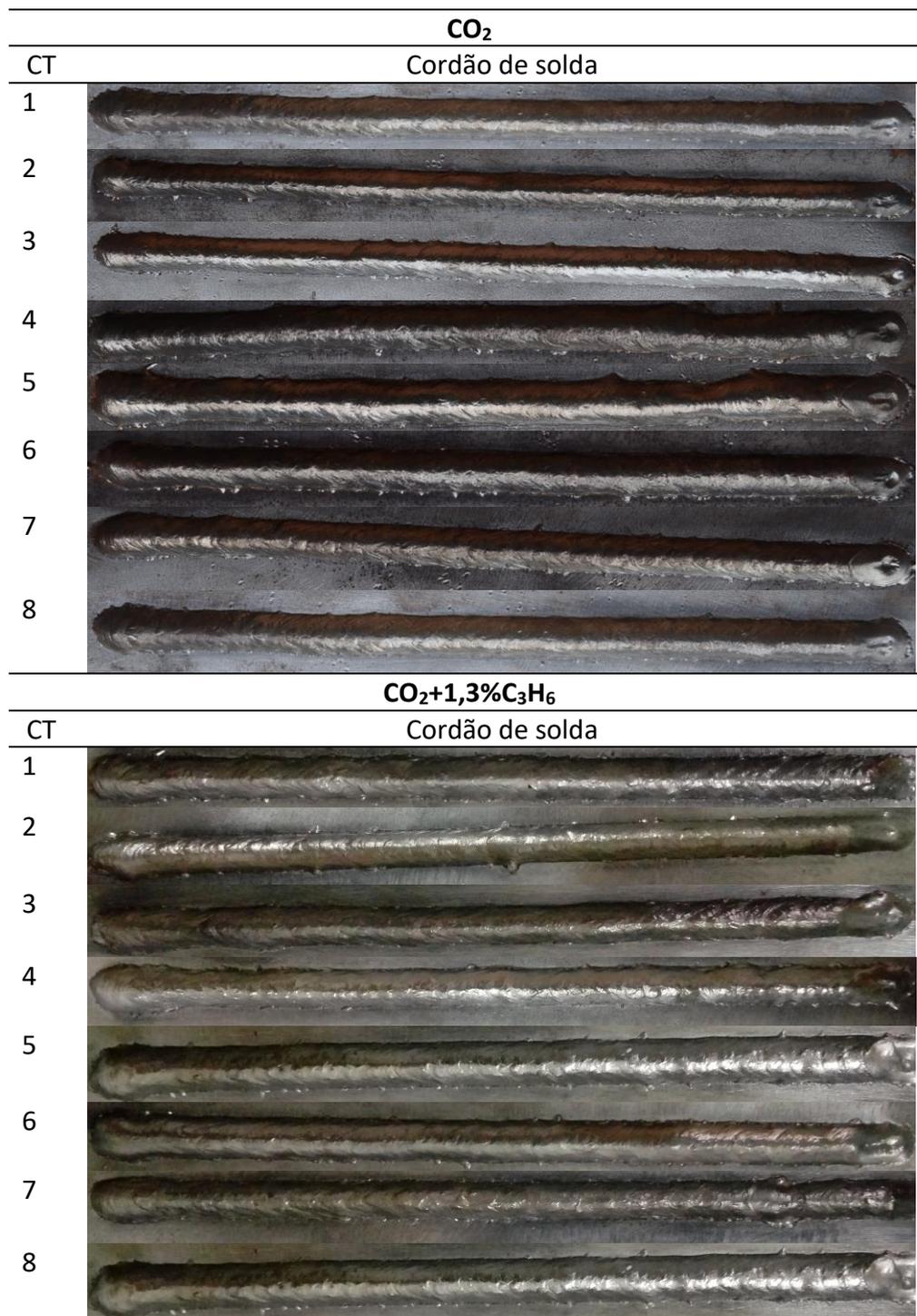
Figura 4.5: a) coletor de respingos sem a tampa mostrando o posicionamento da chapa e da tocha; b) coletor com a tampa mostrando como foi o deslocamento da tocha.

### 4.2.2 Soldagem

A tabela 4.3 mostra os cordões de solda realizados para os quatro gases de proteção, onde foram utilizados os parâmetros de soldagem mais adequados a cada um dos gases estudados, determinados na etapa I.

**Tabela 4.3: Aspectos dos cordões de solda nas condições de pós limpeza.**

<b>Ar+25%CO<sub>2</sub></b>	
CT	Cordão de solda
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
<b>Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub></b>	
CT	Cordão de solda
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	



#### 4.2.3 Inspeção visual e LP

A seguir são comentados e comparados a inspeção visual dos cordões de solda da tabela 4.3.

**a) Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>**

As soldas feitas para estes gases de proteção apresentaram aspecto liso, uniformidade e bom acabamento ao longo dos cordões solda. Não foram verificadas descontinuidades superficiais no ensaio de inspeção visual e no ensaio de LP. Foi observado qualitativamente que as soldas com Ar+25%CO<sub>2</sub> apresentaram menor geração de escória e respingo que as soldas com Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, como também verificado na etapa I.

**b) CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>**

Para as soldas executadas com estes gases foi observado bom aspecto, boa uniformidade e bom acabamento ao longo dos cordões. Não foi observado descontinuidades superficiais tanto na inspeção visual quanto no ensaio de LP. De modo qualitativo foi verificado maior geração de escória e respingo na solda com o gás CO<sub>2</sub> do que nas soldas com CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, o que está de acordo com os resultados obtidos da etapa I.

De uma forma geral, na inspeção visual das soldas realizadas com os quatro gases utilizados, também foi observado que:

- Os parâmetros de soldagem selecionados na etapa I proporcionaram cordões de solda sem descontinuidades e com adequado acabamento, indicando que as soldas foram realizadas dentro da faixa de estabilidade do processo.
- As soldas feitas com Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> apresentaram melhor acabamento e aspecto do que os cordões realizados com CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. Isso está de acordo com os trabalhos de Ribeiro (2016).
- A adição de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> nos gases convencionais produziram cordões de solda isentos de descontinuidades. Entretanto, foi verificada alterações na geração de escória e respingo.

**4.2.4 Avaliação dos sinais elétricos para análise da estabilidade do arco**

A tabela 4.4 mostra os resultados obtidos dos índices de estabilidade calculados (DPPC, DPAA, DPCC e IVcc) para os gases estudados.

**Tabela 4.4: Valores dos índices de estabilidade calculados para os quatro gases de proteção.**

Gás de proteção	Ajuste	CT	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IVcc
Ar+25%CO <sub>2</sub>	19 V 223 A 5,0 m/min.	1	45,3	2,4	0,9	0,72
		2	<b>36,8</b>	<b>1,9</b>	<b>0,8</b>	<b>0,59</b>
		3	45,0	2,3	0,9	0,68
		4	46,5	2,5	0,9	0,77
		5	51,0	2,7	0,9	0,82
		6	45,9	2,4	0,9	0,72
		7	43,7	2,3	0,9	0,71
		8	48,9	2,6	0,9	0,81
		Média	45,3	2,3	0,8	0,70
Ar+25% CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	20 V 229 A 5,0 m/min.	1	61,4	3,1	1,0	0,97
		2	62,2	3,2	1,0	0,90
		3	<b>60,4</b>	<b>3,2</b>	<b>1,0</b>	<b>0,94</b>
		4	61,7	3,2	1,0	1,00
		5	64,1	3,5	1,0	1,00
		6	61,9	3,2	1,0	0,98
		7	61,7	3,2	1,0	0,99
		8	64,6	3,3	1,0	0,99
		Média	62,2	3,2	1,0	0,90
CO <sub>2</sub>	21 V 224 A 5,0 m/min.	1	66,4	2,3	1,4	0,67
		2	67,6	2,2	1,4	0,69
		3	<b>59,9</b>	<b>2,4</b>	<b>1,3</b>	<b>0,69</b>
		4	63,4	2,4	1,4	0,80
		5	64,2	2,5	1,4	0,74
		6	63,1	2,3	1,3	0,66
		7	65,0	2,4	1,3	0,71
		8	62,4	2,4	1,4	0,73
		Média	64,0	2,3	1,3	0,7,0
CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	21 V 228 A 5,0 m/min.	1	63,4	2,5	1,4	0,78
		2	61,8	2,2	1,4	0,60
		3	61,0	2,1	1,4	0,59
		4	64,6	2,4	1,5	0,73
		5	64,7	2,4	1,5	0,67
		6	57,2	2,0	1,3	0,57
		7	62,3	2,2	1,4	0,64
		8	<b>59,5</b>	<b>2,1</b>	<b>1,3</b>	<b>0,68</b>
		Média	61,8	2,2	1,4	0,60

A seguir, os resultados da tabela 4.4 são apresentados sob o formato de gráficos, sendo em seguida discutidos.

### a) Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

A figura 4.6 mostra a variação dos índices de estabilidade para os gases de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.

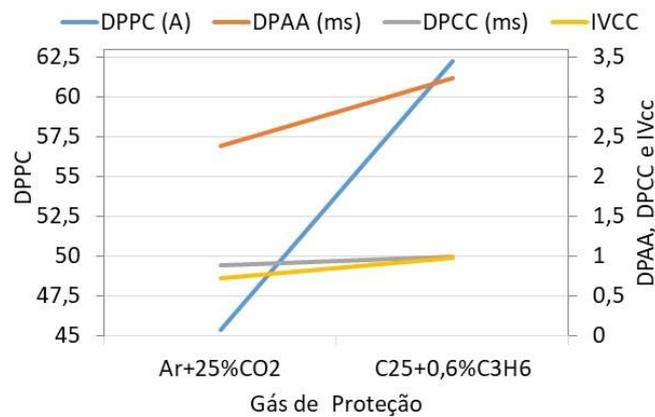


Figura 4.6: Variação dos índices de estabilidade entre os gases de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.

Em relação ao DPAA e o DPCC foi observado que a adição de propileno ligeiramente aumentou estes índices. Isto tende à um aumento tanto no tempo de arco aberto quanto de curto-circuito.

Já para o DPPC foi observado um aumento significativo neste índice para o gás com adição de propileno (62,2 A) em relação ao gás convencional (45,3 A). O que pode indicar menor repetitividade ao longo do tempo de soldagem e menor rapidez em reestabelecer o arco elétrico a cada pico de corrente.

Já o IVcc também foi observado um ligeiro aumento neste índice, evidenciando uma leve tendência à instabilidade do processo.

Os resultados acima mostram que a adição de propileno ao gás Ar+25%CO<sub>2</sub> resultou em maiores valores dos índices DPAA, DPCC e DPPC, indicando uma ligeira perda na estabilidade do processo.

Estes resultados mostram estar em desacordo com os resultados de (Ribeiro, 2016), que relatou uma leve melhora da estabilidade do processo com a adição do propileno para o gás Ar+25%CO<sub>2</sub>. Entretanto o autor utilizou os mesmos parâmetros para as soldas realizadas com os gases Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> e aqui foram utilizados parâmetros distintos para os dois gases analisados.

De uma forma geral, a adição do propileno no gás Ar+25%CO<sub>2</sub> não proporcionou uma melhoria na estabilidade do processo.

## b) CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.

A figura 4.7 mostra a variação dos índices de estabilidade dos gases de proteção CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.

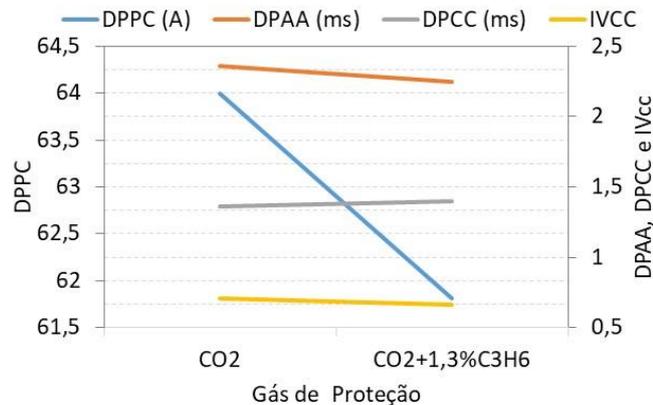


Figura 4.7: Variação dos índices de estabilidade entre os gases de proteção CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.

Em relação o DPPC e o DPAA foi verificado que a adição de propileno propiciou uma pequena diminuição destes índices. Isto indica um ganho de repetitividade ao longo do tempo de soldagem, tendendo uma melhor regularidade da transferência metálica e diminuição da geração de respingos.

Já para o IVcc a adição de propileno também proporcionou uma ligeira diminuição deste índice, evidenciando uma leve tendência de melhora da estabilidade do processo.

Para o DPCC foi observado que a adição de propileno proporcionou um leve aumento deste índice (de 0,1 ms), o que não apresentou diferença significativa para a estabilidade.

Ribeiro (2016) relatou uma leve melhora da estabilidade do processo com a adição do propileno para o gás CO<sub>2</sub>. Este resultado também foi identificado neste trabalho.

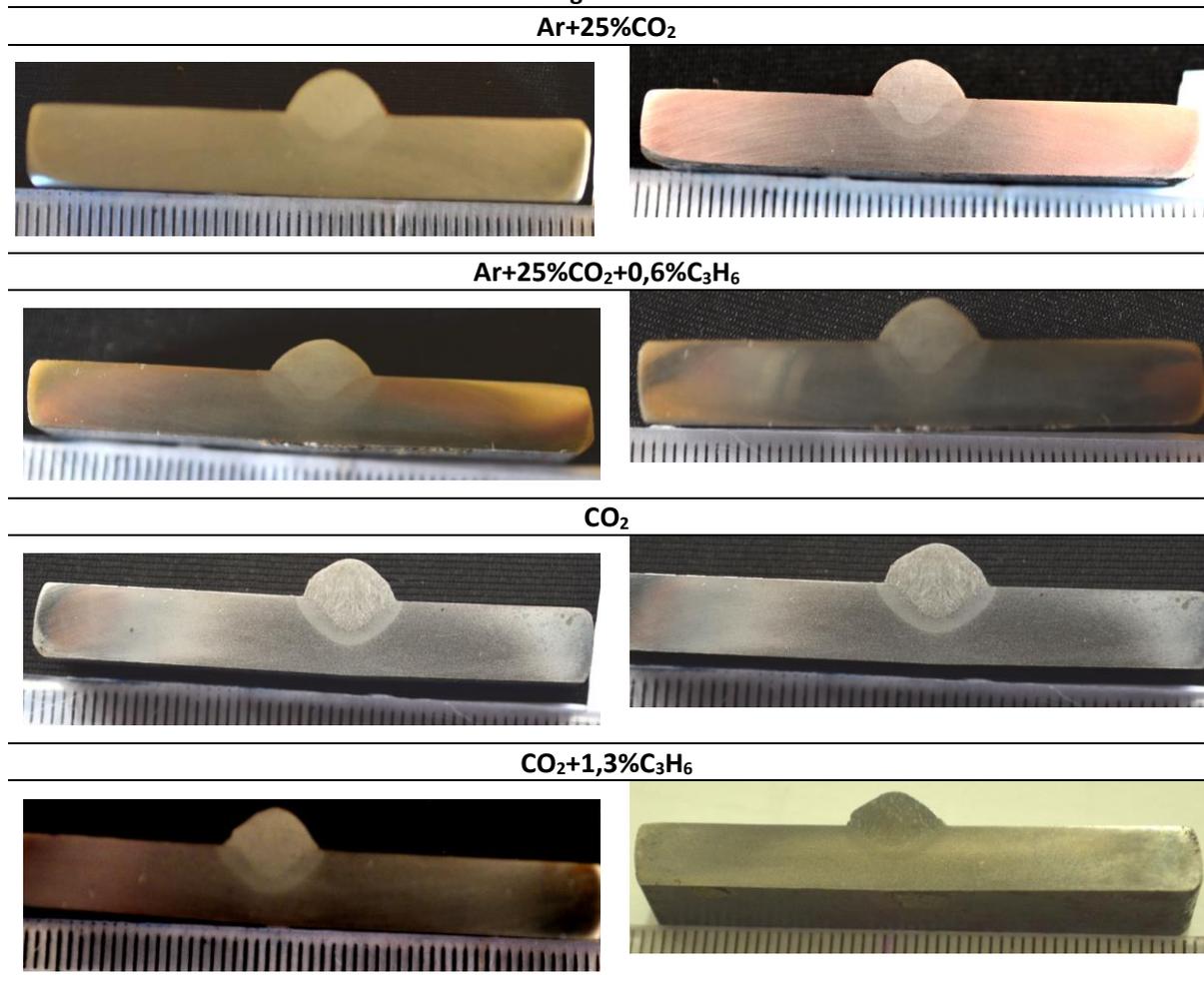
De uma forma geral, a adição do propileno no gás CO<sub>2</sub> provocou um ganho da estabilidade do processo.

#### 4.2.5 Geometria do cordão de solda

A tabela 4.5 mostra as macrografias dos cordões de solda. Nesta tabela pode ser observada a largura, o reforço e a penetração obtidos nos diferentes gases de proteção.

De forma geral, foi observado boa aparência e conformidade das soldas. Ainda, foi verificado uma penetração uniforme e não foram identificadas descontinuidades internas.

Tabela 4.5: Macrografias dos cordões de solda.



A tabela 4.6 mostra, para os quatro gases de proteção os valores medidos da largura, reforço e penetração. Nesta tabela também pode ser visto os valores calculados do índice de convexidade (IC). Na figura 4.8 pode ser visto as variações das médias de largura, penetração, reforço e do IC para os quatro gases de proteção.

Tabela 4.6: Valores da largura, reforço, penetração e do índice de convexidade (IC) dos cordões de solda para os quatro gases de proteção.

Gás de proteção	CT	L (mm)	R (mm)	P (mm)	IC (%)
Ar+25%CO <sub>2</sub>	1	9,1	3,1	2,0	33,8
	2	9,0	3,2	1,7	36,1
	3	8,8	3,3	1,9	37,8
	4	8,9	3,3	1,8	37,0
	5	8,9	3,2	1,6	35,9
	6	8,7	3,2	1,6	36,7
	7	8,5	2,7	1,6	32,1
	8	8,9	2,9	2,1	32,9
	Média	8,8	3,1	1,8	35,3
Ar+25% CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1	9,8	3	2,1	30,6
	2	9,3	3,3	2,2	35,2
	3	9,6	3,1	1,8	32,2
	4	9,1	3,3	2,2	36,2
	5	9,0	3,1	2,4	34,4
	6	9,5	2,6	1,9	27,3
	7	9,7	2,5	2,0	25,7
	8	9,1	2,8	2,4	31,3
	Média	9,3	2,9	2,1	31,6
CO <sub>2</sub>	1	8,9	3,3	2,0	36,8
	2	8,3	3,3	2,4	39,5
	3	8,4	3,3	1,9	39,8
	4	8,4	3,4	2,4	41,0
	5	8,2	3,5	2,5	42,4
	6	8,4	3,3	2,2	39,8
	7	8,5	3,3	2,2	38,8
	8	8,3	3,3	2,5	39,7
	Média	8,4	3,3	2,2	39,7
CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1	8,7	3,3	2,1	37,9
	2	8,3	3,3	2,5	39,7
	3	9,0	3,3	2,6	37,2
	4	8,1	3,4	2,5	41,7
	5	8,6	3,5	2,3	41,0
	6	8,3	3,2	2,8	38,5
	7	8,7	3,35	2,5	38,5
	8	8,2	3,3	2,8	40,0
	Média	8,5	3,3	2,5	39,3

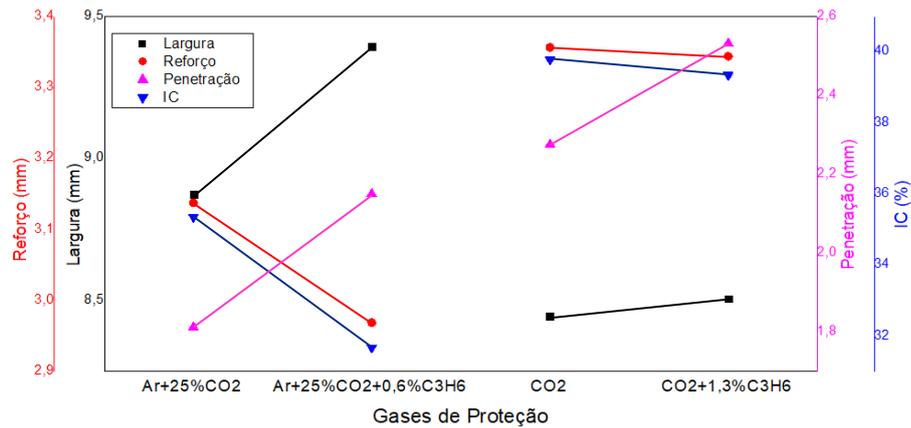


Figura 4.8: Médias da largura, penetração, reforço e do IC para os quatro gases de proteção.

#### a) Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

Em relação a largura e reforço do cordão de solda, a adição de propileno proporcionou maior largura e menor reforço do cordão de solda. Isso foi atribuído à maior tensão (20 V) usada no gás com adição de propileno em relação ao gás convencional (19 V). Por ser um gás molecular o propileno demandou maior tensão de arco, favorecendo a eficiência de fusão e maior zona fundida (Suban e Tusek, 2001). O que justifica os resultados apresentados.

Em relação a penetração do cordão de solda, foi observado maior penetração para o gás com adição de propileno (2,1 mm) em relação ao gás convencional (1,8 mm). Isto foi atribuído a dois fatores: i) à maior intensidade de corrente (229 A) utilizada no gás com adição de propileno comparado com o gás convencional (223 A); ii) devido a maior troca térmica decorrente da adição do C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. Liskevich (2010) relatou que ao aumentar o teor dos gases com maior troca térmica pode aumentar a penetração.

Em relação ao IC, a adição de propileno proporcionou menor IC nos cordões de solda. De acordo com Liskevich (2010) o IC varia em função da largura e reforço, como estas medidas apresentam tendência de correspondência, ou seja, quando a largura aumenta o reforço diminui, o que reflete na diminuição do IC.

Estima-se que um IC próximo de 30% indica um cordão de solda considerado de qualidade, sem reforço excessivo e com penetração adequada (Silva *et al.*, 2000; Tatagiba, 2015).

## b) CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

Em relação a largura, o reforço e o IC do cordão de solda, o gás com adição de propileno apresentou valores semelhantes em comparação com o gás convencional. Isso foi atribuído a dois fatores: i) ter usado a mesma tensão (21 V) para os dois gases; ii) os dois gases apresentam praticamente o mesmo valor de condutividade térmica, tendo o CO<sub>2</sub> com 14,7 mW/m.k e o C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> com 14,67 mW/m.k.

A penetração aumentou com a adição do propileno, em média 0,3 mm maior do que o gás convencional. Isso foi atribuído ao fenômeno de dissociação e recombinação molecular que pode ter liberado H<sub>2</sub> em altas temperaturas. Tatagiba (2015) e Menezes (2016) também observaram que a adição de H<sub>2</sub> produzia um pequeno aumento da penetração nos gases de proteção convencionais.

Liskevich (2010) destaca que o fenômeno de dissociação e recombinação molecular, tende ao crescimento da zona fundida, acompanhando o comportamento da penetração.

Suban e Tusek (2001) destacam que este fenômeno favorece a eficiência de fusão e maior zona fundida. Ainda relatam que gases com maior capacidade de troca térmica demandam maior tensão do arco elétrico. Isso só vem confirmar que os resultados apresentados estão de acordo com a literatura.

De uma forma geral, a adição de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> influenciou no aumento da penetração para os dois gases convencionais. Por outro lado, não influenciou na largura, no reforço e no IC das soldas feitas com o gás CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> em relação ao CO<sub>2</sub>.

### 4.2.6 Avaliação da quantidade de escória e respingos produzidos nas soldas

A tabela 4.7 mostra os valores da geração de escória e respingo, assim como o cálculo da taxa de escória e respingo. A figura 4.9 mostra a variação das taxas de escória e respingo para os quatro gases de proteção.

**Tabela 4.7: Estimativa da taxa de respingo e escória.**

Gás de proteção	Quant. de escória (g)	Quant. de respingo (g)	Tempo de soldagem (min)	Taxa de escória (g/min)	Taxa de respingo (g/min)
Ar+25%CO <sub>2</sub>	0,041	0,620	4,37	0,01	0,14
Ar+25%CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0,153	4,030	4,46	0,03	0,90
CO <sub>2</sub>	0,400	6,090	4,67	0,08	1,30
CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0,320	4,660	4,50	0,07	1,03

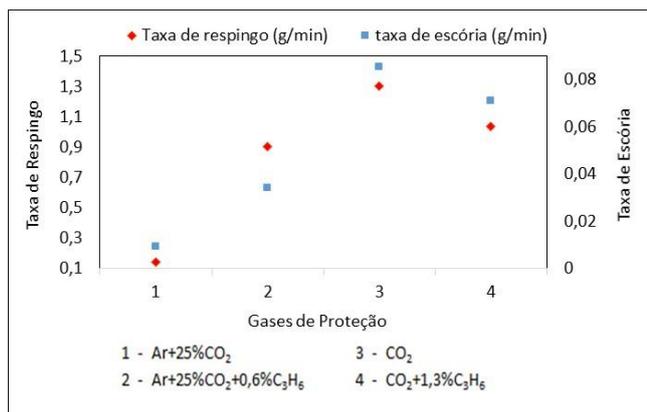


Figura 4.9: Variação da taxa de respingo e escória em função do gás de proteção.

#### a) Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

Em relação a geração de respingo, observa-se um aumento da taxa de respingo para o gás com adição de propileno (0,90 g/min) em relação ao gás convencional (0,14 g/min). Isso foi atribuído à tendência de se obter maior valor nos índices de estabilidade para o gás com adição de propileno, conforme mostrado na figura 4.6. Segundo De Runtz (2003) uma maior instabilidade do arco elétrico proporciona uma violenta separação da gota de metal líquido no momento de sua transferência, provocando uma maior quantidade de respingos.

Em relação a geração de escória foi observado um aumento da taxa de escória para o gás com adição de propileno (0,03 g/min) em relação ao gás convencional (0,01 g/min). Para este caso, o propileno não atuou como redutor.

#### b) CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

Em relação a geração de respingo foi verificado uma diminuição da taxa de respingo para o gás com adição de propileno (1,03 g/min) em relação ao gás convencional (1,30 g/min). Isso foi atribuído a melhor estabilidade obtida com os índices de estabilidade, conforme mostra a figura 4.7. Ainda, pode ser observado que a menor geração de respingo se mostrou proporcional a melhora da estabilidade do processo.

Para a geração de escória, foi observado uma diminuição da taxa de escória para o gás com adição de propileno (0,07 g/min) em relação ao gás convencional (0,08 g/min). Este resultado foi atribuído ao fenômeno de dissociação e recombinação molecular, de modo que o C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> libere H<sub>2</sub> em altas temperaturas

atuando como redutor no processo GMAW. Menezes (2016) verificou para o gás  $\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$  uma diminuição da geração de escória em relação ao gás  $\text{CO}_2$ .

#### 4.2.7 Taxa de deposição

A tabela 4.8 mostra os valores da quantidade de metal depositado, o tempo de soldagem e a taxa de deposição (TD) para os quatro gases de proteção. A figura 4.10 mostra um comparativo da taxa de deposição em função do gás de proteção.

**Tabela 4.8: Quantidade de metal depositado e o tempo de soldagem para cada gás de proteção.**

Gás de proteção	CT	Metal depositado (Kg)	Tempo de soldagem (h)	Taxa de deposição (Kg/h)
Ar+25%CO <sub>2</sub>	1	0,024	0,0091	2,63
	2	0,023	0,0088	2,61
	3	0,024	0,0090	2,66
	4	0,024	0,0090	2,66
	5	0,023	0,0088	2,61
	6	0,024	0,0090	2,66
	7	0,024	0,0093	2,59
	8	0,024	0,0096	2,50
	Média	0,024	0,0091	2,66
Ar+25%CO <sub>2</sub> + 0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1	0,024	0,0094	2,55
	2	0,023	0,0113	2,00
	3	0,022	0,0087	2,53
	4	0,019	0,0076	2,50
	5	0,022	0,0087	2,53
	6	0,025	0,0097	2,58
	7	0,025	0,0095	2,63
	8	0,023	0,0089	2,58
	Média	0,023	0,0092	2,49
CO <sub>2</sub>	1	0,024	0,0099	2,42
	2	0,025	0,0099	2,53
	3	0,023	0,0093	2,47
	4	0,024	0,0100	2,40
	5	0,024	0,0096	2,50
	6	0,024	0,0095	2,53
	7	0,024	0,0096	2,50
	8	0,024	0,0096	2,53
	Média	0,024	0,0097	2,50
CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1	0,023	0,0093	2,47
	2	0,026	0,0096	2,71
	3	0,023	0,0088	2,61
	4	0,022	0,0088	2,5
	5	0,025	0,0095	2,63
	6	0,025	0,0097	2,58
	7	0,024	0,0093	2,58
	8	0,025	0,0096	2,60
	Média	0,024	0,0093	2,60

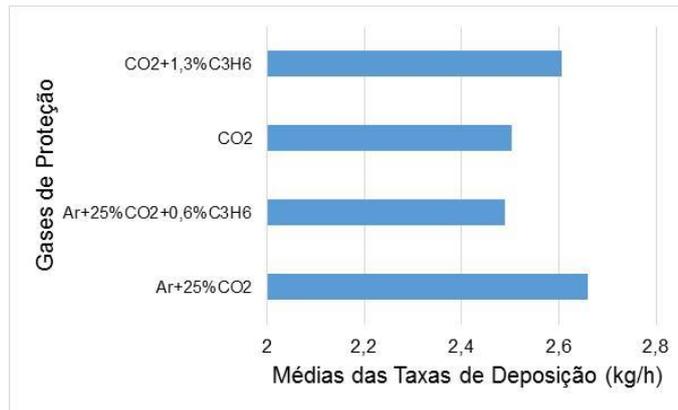


Figura 4.10: Comparativo das médias das taxas de deposição para os quatro gases de proteção.

#### a) Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

A adição de CH<sub>6</sub> no gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> proporcionou menor TD (2,49 kg/h) em relação ao gás convencional (2,66 kg/h). Isto pode ser atribuído a maior geração de escória e respingo para o gás com adição de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> (veja item 4.2.6). A TD encontrada para o gás convencional está de acordo com Ribeiro (2016), no entanto o autor encontrou maior TD para o gás com adição de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> e atribuiu este resultado à maior corrente de soldagem.

#### b) CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

A adição de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> no gás de proteção CO<sub>2</sub> proporcionou maior TD (2,60 kg/h) em relação ao gás convencional (2,50 kg/h). Isso pode ser explicado pelo melhor comportamento do arco elétrico em atmosfera com adição de propileno, produzindo uma menor taxa de respingo.

Outro fator que pode ter elevado a TD para o gás com adição de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> foi atribuído a liberação de H<sub>2</sub> em altas temperaturas que melhorou a capacidade de troca térmica, transferindo maior quantidade de calor a chapa.

Os gases com maior concentração de CO<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> demandaram maior energia de soldagem e apresentaram os menores valores de TD. Suban e Tusek (2001) relatam que gases moleculares tendem a exigir maiores valores de tensão e corrente para possibilitar as reações de dissociação/recombinação molecular, o que tenderia a uma maior Td.

De uma forma geral, não houve alterações significativas na taxa de deposição, pois foi usada a mesma  $V_{alim}$  e pouca diferença na tensão (de 19 a 21 V).

#### 4.2.8 Considerações finais

- O coletor de respingos construído foi eficaz em reter e captar os respingos produzidos, permitindo calcular as taxas de escória e respingo com eficácia.

- A adição de  $C_3H_6$  não influenciou no aspecto, acabamento e uniformidade dos cordões solda, não tendo sido detectadas descontinuidades superficiais.

- A adição de  $C_3H_6$  no gás  $Ar+25\%CO_2$  não apresentou ganho de estabilidade do processo. Por outro lado, o propileno melhorou significativamente a estabilidade do processo para o gás  $CO_2$ .

- A adição de  $C_3H_6$  no  $Ar+25\%CO_2$  aumentou a penetração e a largura, porém diminuiu o reforço e o IC do cordão de solda.

- A adição de  $C_3H_6$  no  $CO_2$  aumentou a penetração, porém não alterou a largura, o reforço e o IC do cordão de solda.

- A geração de respingo e escória se apresentou maior para o gás  $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$  comparado com o gás  $Ar+25\%CO_2$ .

- A geração de respingo e escória se apresentou menor para o gás  $CO_2+1,3\%C_3H_6$  comparado com  $CO_2$ .

- A taxa de deposição se mostrou menor para o gás  $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$  em relação ao gás  $Ar+25\%CO_2$ .

- A taxa de deposição se mostrou maior para o gás  $CO_2+1,3\%C_3H_6$  em relação ao gás  $CO_2$ .

De uma forma geral, a adição de  $C_3H_6$  proporcionou um ganho na estabilidade do processo do gás de proteção  $CO_2$ . Já para o gás  $Ar+25\%CO_2$  a adição de propileno não proporcionou melhora na estabilidade do processo.

### 4.3 Etapa III

O objetivo desta etapa foi avaliar a influência da adição do  $C_3H_6$  nos gases  $Ar+25\%CO_2$  e  $CO_2$  no que diz respeito a microestrutura e a dureza do metal de solda.

#### 4.3.1 Análise da microestrutura no metal de solda

A figura 4.11 mostra as micrografias do metal de solda para os quatro gases de proteção. Foi realizado um estudo para identificar possíveis alterações na

microestrutura do metal de solda, de modo a qualificar os microconstituintes presentes na soldagem com os gases de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>, Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.

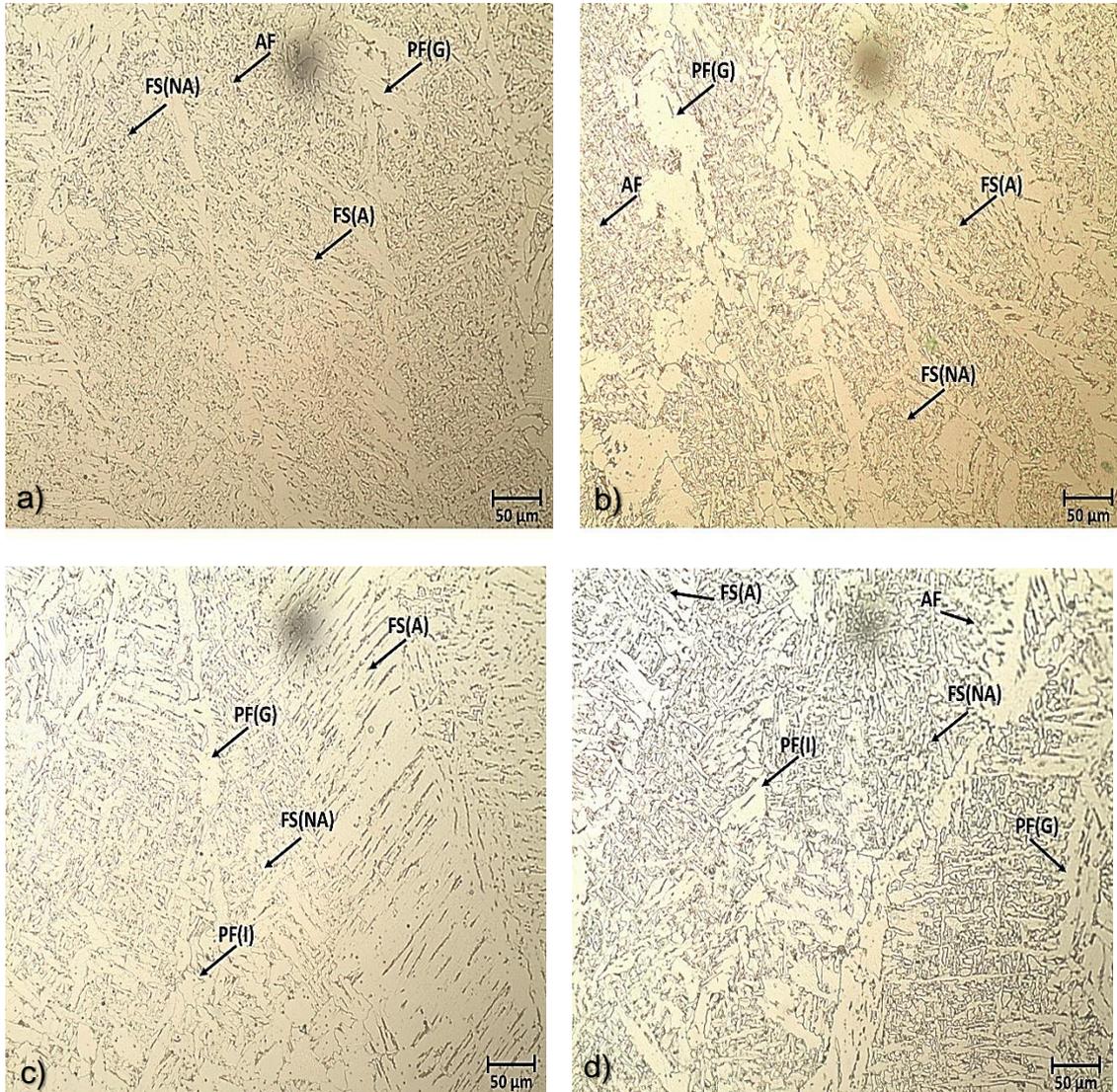


Figura 4.11: Micrografias do metal de solda; (a) Ar+25%CO<sub>2</sub>; (b) Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>; (c) CO<sub>2</sub>; (d) CO<sub>2</sub>+1,3%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. Aumento de 500X.

As microestruturas encontradas aparentam ser típicas de metal de solda de aços ferríticos (Perdigão, 1987; Araújo et al., 2006). Qualitativamente a ZF das soldas realizadas com os gases Ar+25%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>+0,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> apresentou uma microestrutura mais refinada em relação os gases CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>+1,6%C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. No entanto, foi observado para os quatro gases de proteção que as morfologias identificadas foram semelhantes, apresentando uma predominância em ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)) e ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)). Ainda, foi verificado uma pequena quantidade

de ferrita acicular (AF) se comparado com os microconstituintes citados anteriormente. Não foi observado a presença de Martensita (M) e de agregado Ferrita-carbeto (FC) para nenhum dos quatro gases.

Comparando os diferentes tipos de morfologia da ferrita encontrada nas soldas com os gases de proteção convencionais e com adição de propileno, não foi identificado mudanças significativas em relação as morfologias observadas por Tatagiba (2015), Menezes (2016) e Ribeiro (2016).

De uma forma geral, a adição de propileno nos gases de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> não influenciou na microestrutura do metal de solda.

#### 4.3.2 Dureza Vickers

A tabela 4.10 mostra os valores da dureza Vickers para os quatro gases de proteção em estudo. O objetivo deste ensaio foi verificar possíveis mudanças na dureza do cordão de solda ao utilizar gases com adição de propileno.

**Tabela 4.9: Medida da dureza do metal de base (MB), da zona termicamente afetada (ZTA), zona fundida (ZF) e suas respectivas médias.**

Gás de proteção	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Ar+25%CO <sub>2</sub> +0,6%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> +1,3%C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Região do endentamento	Medições da dureza (HV)	
MB	1	158	156	159	157		
MB	2	151	163	164	151		
ZTA	3	170	176	163	162		
ZTA	4	164	181	176	170		
ZTA	5	185	192	195	186		
ZF	6	199	213	187	205		
ZF	7	198	200	171	193		
ZF	8	198	208	226	186		
ZF	9	218	213	212	198		
ZF	10	205	202	203	205		
ZTA	11	179	196	162	171		
ZTA	12	172	176	183	186		
ZTA	13	162	160	166	165		
MB	14	146	163	161	159		
MB	15	154	159	163	157		
Média MB		152	160	161	156		
Média ZTA		172	180	174	173		
Média ZF		203	207	199	197		

Em relação ao MB e a ZTA, os resultados encontrados de dureza Vickers foram bem próximos para os quatro gases de proteção, variando de 152 a 160 HB para o MB e de 172 a 180 HB para a ZTA.

Já em relação a ZF foi observado que:

- A dureza do metal de solda utilizando o gás  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$  em relação ao gás  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$  foi semelhante, apresentando valores médios de 203 e 207 HV respectivamente.
- A dureza do metal de solda usando o gás  $\text{CO}_2$  em relação ao gás  $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$  foi semelhante, apresentando valores médios de 199 e 197 HV respectivamente.
- A dureza do metal de solda para os gases  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$  e  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$  se mostrou ligeiramente maior em relação os gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ . Isto mostra estar de acordo com a microestrutura mais refinada encontrada para os gases  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$  e  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$  (veja item 4.3.1).

De uma forma geral, os resultados aqui apresentados mostram que a adição de propileno não influenciou de maneira significativa na dureza do metal de solda, que está de acordo com os resultados encontrados por Ribeiro (2016).

#### 4.3.3 Considerações Finais

- A adição de propileno não promoveu alterações na microestrutura do metal de solda, que consiste dos diferentes tipos de morfologia da ferrita presente na soldagem dos aços.

- A microestrutura do metal de solda apresentou predominância de PF(G), FS(A) e FS(NA) para os quatro gases de proteção.

- Os quatro gases de proteção apresentaram valores semelhantes de dureza, para o MB, a ZTA e a ZF.

- A adição de propileno aos gases de proteção convencionais não indicaram a formação de fases frágeis e duras como a martensita na microestrutura do metal de solda.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo do efeito da adição do gás propileno aos gases convencionais usados no processo GMAW utilizando transferência metálica por curto-circuito. Foi possível concluir que a adição de propileno, em relação a estabilidade do processo:

- i) demandou maior tensão de soldagem para o gás Ar+25%CO<sub>2</sub> para se obter uma adequada estabilidade. Já para o gás CO<sub>2</sub>, o propileno não demandou alteração na tensão de soldagem.
- ii) não influenciou no aspecto, acabamento e uniformidade dos cordões solda e não apresentou descontinuidades superficiais e internas.
- iii) para a mistura Ar+25%CO<sub>2</sub>, aumentou a penetração e a largura do cordão de solda, entretanto diminuiu o reforço e o IC.
- iv) para o gás CO<sub>2</sub>, aumentou a penetração do cordão de solda, porém não alterou a largura, o reforço e o IC.
- v) aumentou a taxa de respingo e escória para o gás Ar+25%CO<sub>2</sub> e diminuiu estas taxas para o gás CO<sub>2</sub>.
- vi) aumentou a taxa de deposição para o gás CO<sub>2</sub>, porém diminuiu para a mistura Ar+25%CO<sub>2</sub>.
- vii) não promoveu alterações significativas na microestrutura e na dureza do metal de solda.
- viii) por fim, foi possível concluir que a adição de 1,3% de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> ao gás de proteção CO<sub>2</sub> melhorou significativamente a estabilidade do processo. No entanto, a adição de 0,6% de C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> para a mistura Ar+25%CO<sub>2</sub> não apresentou melhoria na estabilidade do processo.

## CAPÍTULO 6: SUGESTÕES

Neste trabalho foram conseguidos dados quantitativos da influência do  $C_3H_6$  no gás de proteção  $Ar+25\%CO_2$  e  $CO_2$  sobre a estabilidade do processo GMAW operando em curto-circuito. Entretanto alguns assuntos ainda ficaram sem esclarecimento. Trabalhos futuros poderiam ser feitos para melhor entendimento dos fenômenos observados em relação a influência do  $C_3H_6$  na estabilidade do processo GMAW. Seguem algumas sugestões:

- Verificar o motivo do propileno não atuar como redutor no  $Ar+25\%CO_2$ , aumentando a taxa de respingo e escória;
- Estudar a estabilidade do processo na soldagem GMAW com adição de propileno no interior de juntas chanfradas e em filetes na posição horizontal;
- Realizar análise de aspecto econômico dos resultados obtidos no presente trabalho, ou seja, verificar se o gás com indicadores de melhor estabilidade é adequado para o meio industrial de ponto de vista econômico;
- Verificar a estabilidade do processo para velocidades de alimentação de arame menores;
- Verificar se a variação da vazão de gás influenciará em alterações nos resultados obtidos;
- Analisar a taxa e os produtos da emissão de fumos durante a soldagem em gases de proteção com adição de  $C_3H_6$ .

## CAPÍTULO 7: REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABENDI (2015). PR-001 – Líquido Penetrante: Procedimento de END. rev. 8.

ABENDI (2011). PR-050 – Ensaio Visual e Dimensional de Soldas: Procedimento de END. rev. 2

Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjö, G., Claesson, I. (1999) On-line Quality Monitoring in Short-Circuit. Gas Metal Arc Welding. Welding Journal, p. 59-73.

AGA - The Linde Gas Group (2014) Folha de dados de segurança do propileno. Disponível em: <<http://www.comercialpitia.com.br/doc/Propylene.pdf>> Acesso em: 11/05/17.

Air Liquide. (2010) *Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico*. Disponível em: [https://industrial.airliquide.com.br/sites/industry\\_br/files/sds/2016/05/30/23.055\\_-\\_mistura\\_c3h6\\_propileno\\_em\\_ar.pdf](https://industrial.airliquide.com.br/sites/industry_br/files/sds/2016/05/30/23.055_-_mistura_c3h6_propileno_em_ar.pdf) em 22/04/2017.

AWS (1991) Gas Metal Arc Welding.Welding – Handbook, vol. 2, 8.ed. Miami: AWS editora, p.109-155.

AWS (2001) A5.18 / A5.18M. Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. AMERICAN WELDING SOCIETY. Miami, p. 403 – 432.

AWS (2005). A5.18/A5.18M. Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding. American Welding Society. Miami, Florida.

AWS (1998) Welding Handbook: Materials and Applications. American Welding Society, vol. 4, Part 2. 8 Ed. Miami, p. 621.

Balmer, (2009) Processo de Soldagem ao Arco Elétrico MIG/MAG (GMAW). Disponível em: [file:///D:/Downloads/BALMER-Apostilas-t%C3%A9cnicas-MIG\\_MAG%20\(4\).pdf](file:///D:/Downloads/BALMER-Apostilas-t%C3%A9cnicas-MIG_MAG%20(4).pdf) – acessado em 04/05/2017.

Barra, S.R. (2003) Influência do Processo MIG/MAG Térmico Sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Florianópolis, p. 209.

Cayo, E.H., Alfaro, S.C.A. (2012) Welding stability assessment in the GMAW-S process based on fuzzy logic by acoustic sensing from arc emissions. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 55: 18-25.

DeRuntz, B. D. (2003). Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry. *Journal Industrial Technology*, vol. 19 n.4, p.03-04.

ESAB. (2005) Processo de Soldagem MIG/MAG (GMAW). Disponível em: [http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0\\_apostilasoldagemmigmag\\_low.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf) – Acessado em 06/06/2017.

ESAB. (2014) Processo de Soldagem MIG/MAG (GMAW). Disponível em: [http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1\\_apostilasoldagemmigmag\\_nova](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoldagemmigmag_nova) – Acessado em 29/04/2017.

FBTS. (2015) Processos de Soldagem: Soldagem MIG/MAG. Disponível em [http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1\\_D4\\_T4\\_MIG%20MAG.pdf](http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1_D4_T4_MIG%20MAG.pdf) – Acessado em 04/05/2017.

Good for Gas Company (2013) Chemical Ionization Potential (eV). Disponível em: [http://goodforgas.com/wp-content/uploads/2013/12/TN2004\\_PID\\_gas\\_table\\_01\\_16\\_09.pdf](http://goodforgas.com/wp-content/uploads/2013/12/TN2004_PID_gas_table_01_16_09.pdf) Acesso em 06/05/2017.

Guile, A.E. (1970) Arc Cathode and Anode Phenomena. *International Institute of Welding*, Doc. 212-170-69, p. 87.

Heald, P.R. et al. (1994) Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER 100S – 1 GMAW Electrode. *Welding Journal*, Miami, p.38-44.

IMC Soldagem. (2005) Manual do Sistema SAPV4 – V 4.0. Florianópolis – SC, 19p.

IMC Soldagem. (2014) Manual do Sistema SAPV4 – V 4.0. 4. ed. Florianópolis - SC, 1-39p.

Jones, A. et al. (1998) *Imagens of a Steel Electrode in Ar-2%O<sub>2</sub> Shielding During Constant Current Gas Metal Arc Welding*. *Welding Journal*, Miami, p.135-141.

Jonsson, P.G., Murphy, A.B., Szekely, J. (1995) *The Influence of Oxygen Additions on Argon-Shielding Gas Metal Arc Welding Processes*. *Welding Journal*. 74(2): p. 48-58.

Kang, M.J., Kim, Y., Ahn, S., Rhee, S. (2003) *Spatter Rate Estimation In The Short-Circuit Transfer Region Of MIG/MAG*. *Welding Journal*, p. 238-247.

Kim, Y.S; Eagar, T.W. (1993) *Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding*. *Welding Journal*, Miami, v.72, n.6, p. 269-278.

Lancaster, J.F. (1986) *The Physics of Welding*. 2.ed. Pergamon Press, International Institute of Welding, 340 p.

Lesnewich, A. (1958) *Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas Shielding Metal Arc Welding: part II - Control of Metal Transfer*. *Welding Journal*, v.37, n.9, p.418-425.

Linnert, G. E. (1994) *Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels*. v.1 - Fundamentals, 4 ed. Miami, Florida, USA: American Welding Society (AWS), 940p.

Liskevych, O., Scotti, A. (2010). *Adaptação do Cálculo da Frequência de Destacamento das Gotas para Índice de Regularidade da transferência Metálica em MIG/MAG por Curto-Circuito*. In: 20º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia.

Lyttle, K.A., Stapon, W.F.G. (1990) *Select the Best Shielding Gas Blend for the*

Application. Welding Journal. 69(11): p. 21 - 27.

Machado, I.G. (1996) Soldagem e Tecnologia e Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, p. 477, editado pelo autor.

Mahan, B.M., Myers R.J. (2005) Química: um curso universitário, São Paulo - SP: Editora Edgard Blücher LTDA. 4ª tradução americana, 7ª reimpressão, 592p.

Marques, P.V.; Modenesi, P.J.; Bracarense, A. Q. (2005) Soldagem – Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 362p.

Menezes, T. P. (2016) Estudo da adição de hidrogênio em misturas convencionais de gás de proteção do processo GMAW. Projeto (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 79p.

Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q., (2007) Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Belo Horizonte – MG, 146p.

Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q., (2009) Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Belo Horizonte – MG, 153p.

Modenesi, P.J. (2004) Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 141p.(Apostila).

Modenesi, P.J., Marques, P.V., Santos, D.B. (2012) Introdução à Metalurgia da Soldagem - Belo Horizonte - MG, Publicação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

Modenesi, Paulo J.; Bracarense, Alexandre Q. (2007) Introdução à Física do Arco Elétrico e suas Aplicações na Soldagem dos Metais. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/Arco.pdf> - Acesso

em: 30/04/2017.

Novozhilov, N. M. (1988) *Fundamental Metallurgy of Gas Shielded Arc Welding*. Gordon and Breach Science Publishers S. A. Amsterdam. 400p.

Perdigão, S. C. (1987). *Instrução para Classificação dos Constituintes Microestruturais do Metal de Solda dos Aços Ferríticos, Utilizando-se Microscopia Ótica*. ABS Associação Brasileira de Soldagem, 18p.

Quintino, L., Pires, I. (1996) *Influence of Shielding Gas Composition on Features of the GMAW Process*. Secção de Tecnologia Mecânica, Instituto Superior Técnico. Lisboa IIW Doc. XII-1427-96. p. 219 - 235.

Rezende G.M.C; Liskévych, O.; Vilarinho L.O., Scotti A. (2011) *Um critério para determinar a regulação da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito*. *Soldagem & Inspeção*. 16(2):98-103

Ribeiro, R. B. G. (2016) *Estudo do Efeito da Adição de Gás Combustível Propileno nas Atmosferas de Proteção Convencionais do Processo GMAW*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, p. 122-174.

Rodrigues, J.A. (1994) *Fundamentos da reação Metal-Gás in: Gases em Metais e Ligas. Fundamentos e aplicações na Engenharia*. Cood. Miranda, P.E.V.; Rodrigues, J.A. Editora Didática e Científica LTSA (EDC). RJ.

SAE (2001). *Chemical Compositions of SAE Carbon Steels – SAE J403*. Society of Automotive Engineers.

Santana, I. J.; Modenesi, P. J. (2011) *Modelagem Matemática do Processo de Soldagem GMAW: Transferência por Vão Livre*. *Soldagem e inspeção*, vol.16, n.3, p.213.

Santos, F. G. (2018) *Estudo do efeito da adição de hidrogênio nos gases de proteção*

convencionais na soldagem GMAW em juntas de topo e ângulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, p. 85-115.

Schwedersky, M. B., Dutra, J. C., Okuyama M.P., Silva, R. H. G. (2011) Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo, 16(34): 333-340.

Scotti, A.; Ponomarev, V. (2008) Soldagem MIG / MAG: melhor entendimento, melhor desempenho (1ª ed.). São Paulo - SP: Artliber Editora, 17-284p.

Scotti, A.; Ponomarev, V. (2014) Soldagem MIG / MAG: melhor entendimento, melhor desempenho (2ª ed.). São Paulo - SP: Artliber Editora, 17-193p.

Slania, J. (1996) Determination of the conditions for stable transfer of metal from the electrode to the molten pool during MAG-welding with short-circuiting and pulsating arcs. *Welding International*, p. 849 – 852.

Silva, C. L. M., Scotti, A. (2002) Avaliação de Geração de Porosidade em Ligas de Alumínio Soldadas pelas Técnicas MIG-P E MIG-PPT. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa – PB, 6p.

Silva, C.R., Ferraresi, V.A., Scotti, A. (2000) A quality and cost approach for welding process selection. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. 22(3). ISSN 0100-7386.

SMITH, A.A. et al., (1962) Characteristics of the Short-Circuiting CO<sub>2</sub> – Shielding Arc. In: *Symposium the Institute of Welding*, 29, London. p.76-91.

Souza, D., Rossi, M. L., Keochequerians, F., Nascimento, V. C., Vilarinho, L. O., Scotti, A. (2011) Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem Sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito. 11f. *Soldag. insp.* São Paulo, vol.16, n.1, p. 22-32.

Stenbacka, N.; Persson, K. A. (1989) Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*. Volume 68, n.11, p. 41-47.

Suban, M., Tusek, J. (2001) Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. *Journal of Materials Processing Technology*, Ljubljana - Slovenia, n.119, p.185-192.

Suban, M., Tusek, J. (2003) Methods for the Determination of Arc Stability. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 430-437.

Tatagiba, L. C. S., Silva, A. G., Paranhos, R., (2012). Caracterização de uma Junta Soldada com Suporte de Solda à Base de Fibra de Vidro. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo, 17(1): 011-018.

Tatagiba, L.C.S. (2015) Formulação de Gases de Proteção com Adições de Gases Redutores para Soldagem MIG/MAG. Tese (Doutorado Engenharia e Ciência de Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 141p.

Teske, M. (2006). Influência da Composição do Gás de Proteção na Soldagem do Aço ASTM A516 pelo Processo MIG-MAG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Curitiba – PR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 120p.

Tusek, J., Suban, M. (2000) 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.

Vaidya, V.V. (2002) Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds. *Welding Journal*. 81(9): 43-48.

Wainer, E., Brandi, S. D., Mello, F. D. H. (1992) *Soldagem - Processos e Metalurgia*. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 494p.

Waszink, J. H. et al. (1982) Heat Generation and Heat Flow in the Filler metal in GMA Welding. *Welding Journal*, Miami, vol. 61, n.8, p.269-280.

White Martins. (2010) WHITE MARTINS PRAXAIR INC: Gases Especiais e Equipamentos. Disponível em: <<http://www.praxair.com.br/gases/specialty-gases>>. Acesso em 07/05/2017.