

**ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE PROPILENO AOS GASES DE
PROTEÇÃO CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW APLICADA
A JUNTAS DE TOPO E ANGULO**

GUILHERME MARANHÃO COSTA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

MARÇO DE 2019

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE PROPILENO AOS GASES DE
PROTEÇÃO CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW APLICADA A JUNTAS
DE TOPO E ANGULO

GUILHERME MARANHÃO COSTA

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.

Orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

MARÇO DE 2019

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE PROPILENO AOS GASES DE
PROTEÇÃO CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW APLICADA A JUNTAS
DE TOPO E ANGULO

GUILHERME MARANHÃO COSTA

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 27 de março de 2019.

Comissão Examinadora:



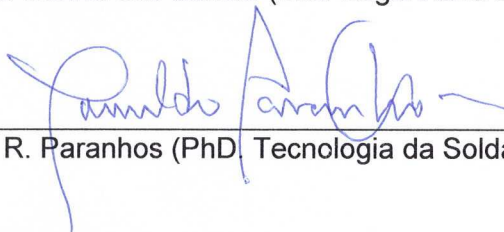
Prof^a. Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova (Dra. Ciência de Materiais Metálicos e Tratamentos Térmicos) – UENF



Prof^a. Elaine Cristina Pereira (DSc. Engenharia e ciência dos materiais) – UENF



Prof^a. Angélica da Cunha dos Santos (Dra. Engenharia e ciência dos materiais) – IFF



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

AGRADECIMENTOS

À Deus, aquele que tem me abençoado por toda esta jornada, me concedendo paz, sabedoria, força e coragem para alcançar meus objetivos.

A meus pais, João Carlos e Rosângela, e meu irmão Carlos Vinicius, por me apoiarem incondicionalmente e serem meus maiores incentivadores, aos quais dedico grande amor.

Ao meu orientador, Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos, pela sua paciência, dedicação e aconselhamento, e por ter compartilhado valioso conhecimento que contribuiu para minha formação profissional.

À Universidades estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), com seus professores e funcionários, deixo minha gratidão, pois foram fundamentais para a execução deste trabalho.

À Fundação de Apoio à Escola Técnica (FAETEC), em especial ao coordenador Fabiano, por ter permitido acesso as instalações do laboratório de soldagem, a ao prof. Jossandro por sua grande contribuição nos experimentos práticos de soldagem.

Ao técnico do laboratório de metalografia do Lamav, Silvio, por toda a ajuda prestada durante este trabalho.

Aos meus amigos de vida acadêmica, Ana Carolina, Ana Hermínia, Anderson, Carolina Araujo, Otavio Augusto, Marcelo Dias, Marcelo Siqueira, com os quais dividi bons momentos e boas risadas.

Aos meus amigos em Cristo da Aliança Bíblica Universitária (ABUB), Verônica, Jordana, Wallison, Deivisson, Víctor, Thais, Diego, Marcelo, Ana Cinthia, Michely, Laís, Hadassa, Valéria, e todos que fazem parte desta grande família, para os quais eu tenho grande amor.

Em especial, a todos os professores do curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UENF, que com seu conhecimento contribuíram para a minha formação profissional.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	IX
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1.1. Objetivo Geral	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Justificativa	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.1. Fenômeno de Emissão Catódica.....	7
2.1.2. Coluna de Plasma	8
2.2. O processo GMAW	10
2.2.1. Variáveis do processo GMAW	12
2.2.1.1. Corrente de Soldagem.....	13
2.2.1.2. Tensão.....	14
2.2.1.3. Velocidade de Soldagem	14
2.2.1.4. Extensão livre do eletrodo.....	15
2.3. Gases de Proteção	17
2.3.1. Propriedades físicas e químicas dos gases de proteção.....	18
2.3.1.1. Potencial de Ionização	19
2.3.1.2. Densidade.....	20
2.3.1.3. Condutividade Térmica	20
2.3.1.4. Potencial de oxidação.....	22
2.3.2. Gases de proteção utilizados no processo GMAW	23
2.3.2.1. Argônio (Ar).....	23
2.3.2.2. Dióxido de Carbono (CO ₂)	24
2.3.3. Misturas gasosas utilizadas no processo GMAW.....	25
2.3.3.1. Misturas Ar-CO ₂	27
2.3.4. Propileno	28
2.4. Transferência Metálica.....	30
2.4.1. Modos de transferência metálica no processo GMAW	30
2.4.2. Forças que governam a Transferência Metálica	33
2.4.2.1. Força Gravitacional (F _g).....	34
2.4.2.2. Força associada a Tensão Superficial (F _y)	35

2.4.2.3.	Força Eletromagnética (F_m)	36
2.4.2.4.	Força de Arraste (F_a)	36
2.4.2.5.	Força de vaporização	37
2.4.3.	Teoria da instabilidade Pinch	37
2.4.4.	Transferência metálica por curto-circuito.....	38
2.4.5.	Transferência Globular	42
2.4.6.	Transferência Goticular	43
2.5.	Estabilidade da soldagem a arco elétrico.....	45
2.5.1.	Indicadores de estabilidade	47
2.5.2.	Aquisição dos sinais elétricos.....	51
2.6.	Juntas	55
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1.	Materiais	57
3.2.	Equipamentos	58
3.3.	Metodologia	59
3.3.1.	Etapa I	59
3.3.1.1.	A preparação das chapas	60
3.3.1.2.	Montagem do equipamento	60
3.3.1.3.	Regulagem do equipamento	61
3.3.1.4.	Aquisição dos sinais elétricos	62
3.3.1.5.	Análise Qualitativa	62
3.3.1.6.	Análise dos sinais elétricos	63
3.3.1.7.	Determinação dos parâmetros da Etapa II	63
3.3.2.	Etapa II	64
3.3.2.1.	A preparação para a soldagem.....	64
3.3.2.1.1.	Preparação das chapas	64
3.3.2.1.2.	Montagem do equipamento.....	65
3.3.2.1.3.	Aquisição dos sinais elétricos	66
3.3.2.2.	Soldagem das chapas	66
3.3.2.3.	Análise qualitativa	67
3.3.2.4.	Avaliação dos sinais elétricos	67
3.3.2.5.	Taxa de respingos e Taxa de escoria	67
3.3.2.6.	Taxa de deposição.....	68
3.3.2.7.	Análise Geométrica.....	69
3.3.3.	Etapa III	70

3.3.3.1.	Análise microestrutural	70
3.3.3.2.	Dureza Vickers.....	71
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1.	Etapa I.....	73
4.1.1.	Soldagem das Chapas	73
4.1.2.	Análise Qualitativa.....	73
4.1.2.1.	Avaliação qualitativa dos resultados	81
4.1.2.1.1.	Determinação das faixas operacionais	82
4.1.3.	Análise da estabilidade do arco elétrico	83
4.1.3.1.	Determinação das faixas operacionais	92
4.1.4.	Determinação dos parâmetros para a Etapa II	93
4.1.5.	Considerações sobre a Etapa I	94
4.2.	Etapa II.....	94
4.2.1.	Soldagem das chapas.....	94
4.2.2.	Análise qualitativa.....	96
4.2.2.1.	Avaliação da análise qualitativa	100
4.2.3.	Análise da estabilidade do processo	101
4.2.3.1.	Ar+25%CO ₂ e Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	102
4.2.3.2.	CO ₂ e CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆	106
4.2.3.3.	Análise geral da estabilidade do processo.....	109
4.2.4.	Taxa de escória e taxa de respingos.....	112
4.2.5.	Taxa de deposição	115
4.2.6.	Análise geométrica.....	118
4.2.6.1.	Junta de Topo	118
4.2.6.2.	Junta em Ângulo	121
4.2.7.	Considerações sobre a etapa II.....	123
4.3.	tapa III	124
4.3.1.	Análise microestrutural	125
4.3.2.	Dureza Vickers	128
4.3.3.	Considerações sobre a etapa III.....	131
5.	CONCLUSÕES	132
6.	SUGESTÕES	133
7.	BIBLIOGRAFIA.....	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de potencial em um arco e suas regiões.....	6
Figura 2- 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.....	8
Figura 3 - Perda térmica da coluna de plasma de um arco.....	9
Figura 4 – Processo GMAW.....	11
Figura 5 - Componentes de um sistema de soldagem do processo GMAW.....	12
Figura 6 - Relação entre a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame.....	13
Figura 7 - Efeito da velocidade de soldagem sobre a profundidade de penetração do cordão de solda Adaptado de SCOTTI & PONOMAREV (2014).....	15
Figura 8 - Representação esquemática da extensão livre do eletrodo (stick-out).	16
Figura 9 – Extensão do eletrodo e taxa de deposição.....	17
Figura 10 – Principais efeitos dos gases de proteção no processo GMAW.....	18
Figura 11 – Condutividade térmica dos gases no processo GMAW.....	21
Figura 12 – Perfis de penetração dos gases de proteção no processo GMAW....	22
Figura 13 - Efeito do aumento do teor do CO ₂ sobre o destacamento da gota....	28
Figura 14 – Reações de combustão envolvendo o C ₃ H ₆	30
Figura 15 – Modos de transferência metálica em soldagem GMAW.....	31

Figura 16 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio	33
Figura 17 – Forças governantes na transferência metálica no processo GMAW .	34
Figura 18 – Oscilograma típico de uma transferência por curto-circuito para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O2....	39
Figura 19 – Variação de corrente e tensão durante a transferência por curto-circuito.....	40
Figura 20 - Efeito da regulagem de indutância nas taxas de variação da corrente em função da corrente de soldagem, utilizando arame tubular E70C-6M e gás de proteção Ar+25%CO2	41
Figura 21 – Oscilogramas de tensão e corrente mostrando a ocorrência de curtos-circuitos incidentais	42
Figura 22 – Transferência metálica globular na soldagem de aço carbono e proteção com Ar + 5%O ₂	43
Figura 23 - Transferência metálica globular na soldagem de aço carbono e proteção com Ar + 5%O ₂	44
Figura 24 - Oscilogramas de transferências globular, spray e spray com alongamento ou streaming. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O ₂	46
Figura 25 – Painel de conexões do sistema SAP v4.....	52
Figura 26 – Oscilogramas de corrente produzido pelo SAP v4.....	53
Figura 27 - Oscilogramas de corrente produzido pelo SAP v4.....	53
Figura 28 – Informações gerais e específicas obtidas pelo SAP v4.....	54
Figura 29 - Características dimensionais dos chanfros e das soldas de topo e filete.	56
Figura 30 – Perfil da chapa de teste	60

Figura 31 – Especificações das juntas de soldagem: a) Topo com chanfro em V, b) Ângulo em T.....	65
Figura 32 - Coletor de respingos.....	65
Figura 33 - Parâmetros geométricos do cordão de filete em junta tipo “T”	69
Figura 34 - Parâmetros geométricos do cordão de solda em junta do tipo “V” com penetração: a) Total e b) Parcial. Fonte: AWS (2001)	69
Figura 35 – Índices da estabilidade das soldas com Ar+25%CO ₂ e V _{alim} de 4 m/min	84
Figura 36 – Índices da estabilidade das soldas com Ar+25%CO ₂ e V _{alim} de 5 m/min	85
Figura 37 – Índices da estabilidade das soldas com Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ e V _{alim} de 4 m/min	86
Figura 38 – Índices da estabilidade das soldas com Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ e V _{alim} de 5 m/min.....	87
Figura 39 – Índices da estabilidade das soldas com CO ₂ e V _{alim} de 4 m/min	88
Figura 40 – Índices da estabilidade das soldas com CO ₂ e V _{alim} de 5 m/min	89
Figura 41 – Índices da estabilidade das soldas com CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆ e V _{alim} de 4 m/min	90
Figura 42 – Índices da estabilidade das soldas com CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆ e V _{alim} de 5 m/min	91
Figura 43 – Corpos de prova preparados com A) junta de topo em V e B) junta de ângulo em T	95
Figura 44 – Índices de estabilidade soldas com Ar+25%CO ₂ e Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ e	103
Figura 45 – Índices de estabilidade das soldas com Ar+25%CO ₂ e Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ e V _{alim} de 4 m/min	105

Figura 46 – Índices de estabilidade das soldas com CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 4 m/min	107
Figura 47 – Índices de estabilidade dos corpos de prova soldados com CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$	108
Figura 48 – Índices de estabilidade das soldas realizadas nas etapas I e II com V_{alim} de 4 m/min.....	110
Figura 49 – Índices de estabilidade das soldas realizadas nas etapas I e II com V_{alim} de 5 m/min.....	111
Figura 50 – Taxa de respingos e taxa de escória	112
Figura 51 – Taxa de Deposição das soldas que utilizaram $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$	116
Figura 52 – Taxa de Deposição das soldas que utilizaram CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ como gás de proteção.....	118
Figura 53 – Macrografias dos corpos de prova com junta de topo.....	120
Figura 54 - Dimensões dos cordões de solda dos corpos de prova com junta de topo	120
Figura 55 – Macrografias dos corpos de prova com junta em Ângulo	122
Figura 56 - Dimensões dos cordões de solda dos corpos de prova com junta em ângulo	123
Figura 57 – Evolução microestrutural da junta soldada com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$. Aumento de 400x	125
Figura 58 – Micrografias das ZF dos corpos de prova, aumento de 500x:	126
Figura 59 – Perfis de dureza	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de ionização dos gases de proteção mais utilizados em soldagem. Fonte: Scotti e Ponomarev (2014).....	19
Tabela 2 – Densidades dos gases de proteção do processo GMAW	20
Tabela 3 – Formulações de gases para proteção no processo GMAW	25
Tabela 4: Modos de transferência naturais	32
Tabela 5 – Tipos de juntas aplicadas a soldagem	55
Tabela 6 – Composição química do aço SAE1020 e do arame ER70S-6	57
Tabela 7 – Composição dos gases de proteção	58
Tabela 8 – Parâmetros que foram mantidos constantes para a soldagem das chapas na Etapa I	61
Tabela 9 – Quantidades de chapas	66
Tabela 10 - Microestruturas principais do metal de solda	71
Tabela 11 - Ensaios de IV e LP das soldas com Ar+25%CO ₂ e V _{alim} de 4 m/min .	74
Tabela 12 - Ensaios de IV e LP das soldas com Ar+25%CO ₂ e V _{alim} de 5 m/min .	75
Tabela 13 - Ensaios de IV e LP das soldas com Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ e V _{alim} de 4 m/min	76
Tabela 14 - Ensaios de IV e LP das soldas com Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ e V _{alim} de 5 m/min	77
Tabela 15 - Ensaios de IV e LP das soldas com CO ₂ e V _{alim} de 4 m/min.....	78
Tabela 16 - Ensaios de IV e LP das soldas com CO ₂ e V _{alim} de 5 m/min.....	79

Tabela 17 - Ensaio de IV e LP das soldas com $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 4 m/min	80
Tabela 18 - Ensaio de IV e LP das soldas com $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 5 m/min	81
Tabela 19 - Faixas de estabilidade definidas com base na análise qualitativa	83
Tabela 20 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e V_{alim} de 4m/min	84
Tabela 21 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e V_{alim} de 5 m/min	85
Tabela 22 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos pelas soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2 +0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 4 m/min	86
Tabela 23 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2 +0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 5 m/min	87
Tabela 24 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com CO_2 e V_{alim} de 4 m/min.	88
Tabela 25 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com CO_2 e V_{alim} de 5 m/min	89
Tabela 26 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com	90
Tabela 27 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 5m/min.....	91
Tabela 28 - Faixas de tensão definidas com base na análise dos sinais elétricos	92
Tabela 25 – Valores de tensão selecionados para a soldagem dos corpos de prova	93
Tabela 30 – Matriz de experimentos para a segunda a Etapa II	95
Tabela 31 - Inspeção Visual e Líquido Penetrante das soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$.	97

Tabela 32 - Inspeção Visual e Líquido Penetrante das soldas com CO ₂	98
Tabela 33 - Inspeção Visual e Líquido Penetrante das soldas com CO ₂	99
Tabela 34 - Inspeção Visual e Líquido Penetrante das soldas com CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆	100
Tabela 35 – Índices de estabilidades das soldas com Ar+25%CO ₂ e Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ e	103
Tabela 36 – Índices de estabilidades das soldas com Ar+25%CO ₂ e Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ e	104
Tabela 37 – Índices de estabilidades das soldas com CO ₂ e CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆ e V _{alim} de 4 m/min.....	106
Tabela 38 – Índices de estabilidades das soldas com CO ₂ e CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆ ...	108
Tabela 39 – Taxa de respingos e Taxa de escória	113
Tabela 40 – Cálculo da Taxa de Deposição	116
Tabela 41 – Cálculo da Taxa de Deposição	117
Tabela 42 – Dimensões dos cordões de soldas dos corpos de prova com junta de Topo.....	119
Tabela 43 - Dimensões dos cordões de soldas dos corpos de prova com junta em T.....	122
Tabela 45 – Valores de dureza medidos.....	129
Tabela 46 – Valores médios de dureza.....	129

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo geral a avaliação dos efeitos da adição de 1,3% de C_3H_6 ao CO_2 puro e 0,6% de C_3H_6 a mistura de $Ar+25\%CO_2$, na soldagem de aço carbono utilizando o processo Gas Metal Arc Welding (GMAW) aplicado a juntas de topo e ângulo. O procedimento experimental foi dividido em três etapas. Na primeira etapa foram determinadas as faixas operacionais em que o processo de soldagem apresentou uma adequada estabilidade. Na segunda etapa foi realizada a soldagem das chapas em juntas de topo com chanfro em V e juntas de ângulo em T, para avaliar os efeitos da adição de C_3H_6 em uma situação operacional. Por fim, na terceira etapa foi realizada uma análise da microestrutura e da dureza dos cordões de solda. Foi possível identificar, para os quatro gases utilizados, faixas operacionais em que a estabilidade do processo foi considerada adequada. A análise qualitativa mostrou que a adição de C_3H_6 não alterou o aspecto e a distribuição dos cordões de solda. A adição de C_3H_6 foi benéfica ao CO_2 , reduzindo as quantidades de escória e respingos, gerando um pequeno aumento na taxa de deposição, e aumentando os valores de garganta efetiva e penetração de raiz. Por outro lado, a adição de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$ não foi vantajosa, resultando em maiores quantidades de escória e respingos, uma taxa de deposição ligeiramente menor e menor penetração de raiz. A adição de C_3H_6 não se mostrou efetiva a V_{alim} de 4 m/min, não resultando em alterações significativas da estabilidade do processo. No entanto, na V_{alim} de 5 m/min, a adição de C_3H_6 proporcionou uma melhora do comportamento operacional do processo para o CO_2 , e uma piora para o $Ar+25\%CO_2$. A adição de C_3H_6 não resultou em alterações significativas tanto na microestrutura do metal de solda, que manteve a predominância de AF, PF e FS(A), quanto nos valores de dureza apresentados por MB, ZTA e ZF. Em resumo, a adição de C_3H_6 foi benéfica para o CO_2 , resultando em um aumento da produtividade de forma geral, e não apresentou vantagens para o $Ar+25\%CO_2$, reduzindo a eficiência do processo.

Palavras-chave: GMAW, Estabilidade do processo, Gases de proteção, Efeito do propileno, Comportamento operacional.

ABSTRACT

The present study had as general objective the evaluation of the effects of the addition of 1.3% of C_3H_6 to pure CO_2 and 0.6% of C_3H_6 to the mixture of $Ar+25\%CO_2$ in the welding of carbon steel using the Gas Metal Arc Welding (GMAW) process applied to top and angle joints. The experimental procedure was divided into three stages. In the first step the operational ranges were determined in which the welding process presented an adequate stability. In the second stage, the sheets were welded to V-groove top joints and T-joint joints to evaluate the effects of the addition of C_3H_6 in an operational situation. Finally, in the third stage an analysis of the microstructure and the hardness of the weld beads was carried out. It was possible to identify, for the four gases used, operational ranges in which the stability of the process was considered adequate. The qualitative analysis showed that the addition of C_3H_6 did not alter the appearance and distribution of the weld beads. The addition of C_3H_6 was beneficial to CO_2 , reducing the amounts of slag and spatter, generating a small increase in deposition rate, and increasing the values of effective throat and root penetration. On the other hand, addition of C_3H_6 to $Ar+25\%CO_2$ was not advantageous, resulting in higher amounts of slag and spatter, a slightly lower deposition rate and lower root penetration. The addition of C_3H_6 did not prove to be effective at 4 m / min, without resulting in significant changes in the stability of the process. However, in 5 m / min, the addition of C_3H_6 provided an improvement in the operational behavior of the process for CO_2 , and a worsening for $Ar+25\%CO_2$. The addition of C_3H_6 did not result in significant changes in both the microstructure of the weld metal, which maintained the predominance of AF, PF and FS (A), and in the hardness values presented by MB, ZTA and ZF. In summary, the addition of C_3H_6 was beneficial for CO_2 , resulting in increased productivity overall, and presented no advantages for $Ar+25\%CO_2$, reducing process efficiency.

Keywords: GMAW, Process stability, Protective gases, Propylene effect, Operational behavior.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico da indústria, estimulado pelo acelerado crescimento econômico, vem impulsionando o desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos métodos de fabricação atualmente utilizados. Neste cenário, a soldagem apresenta papel de destaque, com a busca pela melhoria de suas propriedades, como resistência mecânica e tenacidade, assim como uma melhor relação entre custo, produtividade e qualidade (Gallego e Ventrella, 2014)

Dentre vários processos, podemos destacar a soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW), que consiste na união entre duas peças metálicas promovida pela fusão de um eletrodo, na forma de arame continuamente alimentado, por meio de um arco elétrico estabelecido com o metal base. Este tipo de processo utiliza gases, que podem ser inertes ou ativos, com o objetivo de proteger a região de solda da contaminação do meio ambiente (Marques et al., 2011).

Apesar de, atualmente, ser o centro de uma variedade de pesquisas, ainda há muito o que se investigar sobre o processo GMAW, como por exemplo os gases utilizados na proteção da região de soldagem. A atmosfera protetora formada por esses gases afeta parâmetros importantes da soldagem, como o tipo transferência metálica, a estabilidade do arco elétrico, a quantidade de escoria e respingos gerados, características mecânicas e metalúrgicas do metal ou liga metálica, a profundidade e geometria do cordão de solda. A influência dos gases de proteção no processo GMAW possibilita o estudo com diferentes misturas de gases, com o objetivo de suprir determinadas necessidades da indústria que as misturas de gases convencionais não satisfazem (Liskevych, 2010; Menezes, 2016).

O desenvolvimento de estudos relacionados aos gases de proteção abre espaço para a utilização de gases combustíveis adicionados a atmosferas protetoras convencionais, onde se destacam os hidrocarbonetos, o que se deve ao considerável poder redutor proveniente da liberação de H_2 durante as reações de decomposição e à grande quantidade de energia térmica liberada durante a sua ressociação (Menezes, 2016; Polonine, 2018; Ribeiro, 2016; Tatagiba, 2015). O propileno, de formulação química C_3H_6 , e se destaca entre os hidrocarbonetos

devido a sua relação H/C, onde, durante a dissociação, para cada molécula de H_2 liberado ocorre o fornecimento de um átomo de carbono. Como consequência, a maior produção de hidrogênio contribui para a produção de um cordão de solda mais limpo, pois o hidrogênio atua dificultando a formação de óxidos, o que evita que a mistura gasosa apresente um potencial de oxidação elevado, produzindo um arco mais estável (Ramalho, 2008).

1.1. Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo geral a avaliação dos efeitos da adição de 1,3% de C_3H_6 ao CO_2 puro e 0,6% de C_3H_6 a mistura de $Ar+25\%CO_2$, na soldagem de aço carbono utilizando o processo Gas Metal Arc Welding (GMAW) aplicado a juntas de topo e ângulo.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar testes para a determinação dos parâmetros que resultem na maior estabilidade possível para o arco elétrico durante a soldagem na transferência metálica por curto circuito;
- Analisar comparativamente os dados obtidos a partir das soldagens com gases convencionais em relação aos gases com adição de propileno, a fim de avaliar possíveis alterações;
- Realizar o monitoramento dos sinais elétricos durante a soldagem para a avaliação da estabilidade do processo;
- Determinar as taxas de produção de escória e de respingos, assim como a taxa de deposição para cada uma das atmosferas gasosas;
- Realizar uma avaliação por meio de ensaios não destrutivos com o intuito de revelar quaisquer descontinuidades que os cordões de solda possam apresentar;
- Avaliar as propriedades dos cordões de solda por meio de análise geométrica, microestrutural e dureza Vickers para cada atmosfera gasosa;

1.3. Justificativa

Desde o seu surgimento, até os dias atuais, o processo GMAW tem se mostrado extremamente versátil, devido a sua alta produtividade e boa qualidade dos cordões de solda produzidos, sendo amplamente aplicado pela indústria. O crescimento da economia, e principalmente da competitividade no setor industrial, resultou no desenvolvimento de métodos de produção, equipamentos e consumíveis cada vez mais eficientes, atingindo níveis de produtividade cada vez maiores. Como resultado, o processo GMAW tem sido alvo que uma grande variedade de pesquisas, devido a sua versatilidade e alta produtividade.

No entanto os gases de proteção não acompanharam este desenvolvimento tecnológico, com a indústria ainda utilizando base o Ar, CO₂, He e O₂. Como Tatagiba (2015) mostra em seu trabalho, a quantidade de estudos e patentes referentes a gases de proteção para o processo GMAW tem sido muito escassos ao longo das últimas décadas. Este cenário mostra que ainda existe um campo de pesquisa muito inexplorado quando se fala em gases de proteção, principalmente em relação a adição de novos componentes.

Em seu trabalho Ribeiro (2016) estudou a adição de propileno (C₃H₆) à mistura convencional de Ar+CO₂ e ao CO₂ puro. Foi verificado que a adição de até 1,5% C₃H₆ às mistura de Ar+25CO₂ e a adição de até 2,5% C₃H₆ ao CO₂, na soldagem com transferencia por curto-circuito, se mostraram satisfatorias, gerando soldas com bom aspecto visual, adequadas características geométricas e isentas de descontinuidades. As adições de propileno resultaram em uma maior média dos picos de corrente e da taxa de descida da corrente, menor desvio padrão dos períodos de curto-circuito bem como melhor regularidade da transferência metálica, sem provocar alterações significativas na microestrutura, na composição química e no perfil de dureza do metal de solda.

Polonine (2018), baseado nos resultados obtidos por Ribeiro (2016). analisou os efeitos da adição de 0,6% de C₃H₆ à mistura de Ar+25%CO₂, e 1,3%C₃H₆ ao CO₂ puro na soldagem com transferencia por curto-circuito, realizando, tanto para os gases convencionais, quanto para os gases com adição de C₃H₆, uma exploração para determinar os parametros onde a estabilidade do processo apresenta uma estabilidade adequada. A partir dos parâmetros determinados foram realizadas soldas com o intuito de evidenciar os efeitos da

adição de propilenos sobre o processo de soldagem. Os resultados mostram 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

Os trabalhos realizados por Ribeiro e Polonine mostram que a adição de propileno, de forma geral resulta em uma maior estabilidade do processo de soldagem, no entanto, o caráter desses trabalhos foi essencialmente experimental, com a realização de soldas do tipo cordões sobre a chapa. Desta forma, este trabalho avalia os efeitos da adição de propileno à mistura convencional de $Ar+CO_2$ e ao CO_2 puro em um âmbito operacional, através da soldagem utilizando juntas de topo e ângulo, sendo estes formatos usualmente aplicados em diversos projetos na indústria. A principal diferença entre a soldagem do tipo cordão sobre a chapa e a utilização de juntas está relacionada à velocidade de resfriamento. Devido à maior área de contato entre o cordão de solda e o metal base proporcionada pela utilização de juntas, a velocidade de resfriamento é consideravelmente maior, o que resulta alterações da microestrutura e dos níveis de tensões residuais. Neste caso a utilização de juntas resulta em uma situação mais próxima do que seria obtido na indústria.

Para isto serão utilizados os gases convencionais $Ar+25\%CO_2$ e CO_2 puro, e as formulações com a adição de 1,3% de C_3H_6 ao CO_2 puro e 0,6% de C_3H_6 a mistura de $Ar+25\%CO_2$. Serão realizados testes para a determinação dos parâmetros que melhor atendem a soldagem com estas atmosferas gasosas, uma avaliação da estabilidade do processo através dos sinais elétricos emitidos durante a soldagem, análises qualitativas e quantitativas dos cordões de solda formados, além de análises geométricas, microestruturais e de dureza Vickers da região de solda. Os resultados que serão obtidos servirão de base para uma avaliação da viabilidade da utilização do propileno em atmosferas gasosas no processo GMAW.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Arco elétrico

Atualmente, o arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada em soldagem, o que se deve a características como: adequada quantidade de energia para a fusão localizada, facilidade de controle e alta produtividade. Consequentemente a soldagem a arco elétrico se tornou um dos principais processos aplicados na indústria, sendo utilizado desde a fabricação, até o reparo de estruturas, componentes e peças (Modenesi, 2012).

De acordo com Scotti & Ponomarev (2014) o arco elétrico é uma região plasmática de grande quantidade de corrente, que se forma entre a ponta do eletrodo e o metal base, e age como fonte de calor para a fusão dos metais durante a soldagem.

Para que o arco elétrico seja mantido, é necessário que haja condutividade elétrica, porém, em condições normais, os gases que compõe a atmosfera protetora não são condutores. Entretanto, em condições especiais (alta temperatura, baixa pressão ou campo elétrico de alta intensidade), os gases protetores se ionizam, passando à um estado conhecido como plasma, que por sua vez é um condutor elétrico, o que possibilita que seja gerada energia térmica suficiente para a fusão localizada do metal base (Marques et al., 2011; Modenesi, 2012; Scotti & Ponomarev, 2014).

Uma das características mais importantes do arco elétrico é a diferença de potencial que existe entre às suas extremidades, que mantém contato com a ponta do eletrodo e o metal base (Marques et al, 2011). Esta diferença de potencial evidencia que a queda de potencial ao longo do arco não é uniforme, o que resulta na divisão do arco em três regiões distintas, vistas na figura 1:

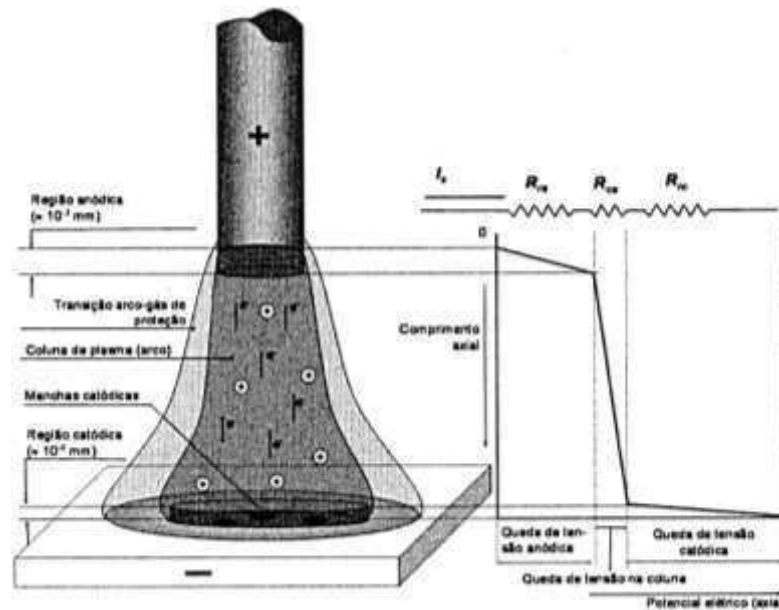


Figura 1 - Distribuição de potencial em um arco e suas regiões

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

Como é mostrado pela figura 1, o arco elétrico é dividido em três regiões: Zona de Queda Catódica, Coluna de Plasma e Zona de Queda Anódica. De acordo com Modenesi (2012), as principais características de cada uma das regiões são:

1. Região Catódica:

- Queda de tensão (U_c) = 1 a 15 V.
- Elevado gradiente (campo) elétrico: $\approx 10^8$ V/m.
- Elevado gradiente térmico $\approx 10^5 - 10^6$ K/m
- Contração: $\approx 10^6 - 10^{14}$ A/m²

2. Coluna de Plasma:

- Queda de tensão (V_{cp}): $E \cdot l_a$, onde E é o campo elétrico na coluna e depende de vários fatores (principalmente da composição do gás de proteção) e l_a é o comprimento do arco em milímetros.
- Altas temperaturas (suficiente para ionizar o gás que irá formar o plasma).
- Equilíbrio térmico (ou quase-equilíbrio térmico).
- Equilíbrio elétrico.
- Fluxo de matéria (em soldagem, este é, geralmente, do eletrodo para a peça).

3. Região Anódica:

- Queda de tensão (a): 1 a 10 V.
- Elevado gradiente (campo) elétrico: $\approx 10^6$ - 10^7 V/m.
- Elevado gradiente térmico: $\approx 10^5$ - 10^6 K/m.
- Contração (aumento da densidade de corrente em relação à coluna de plasma): $\approx 10^6$ - 10^9 A/m².

A região catódica é de grande importância no processo GMAW, pois nela se originam os elétrons responsáveis pela condução da corrente elétrica através do arco (Silva, 2005). O aquecimento da região catódica ocorre pela ação dos íons incidentes. Estes são acelerados ao atravessar o campo elétrico que se forma e se mantém sobre o cátodo, e essa energia cinética é entregue na colisão dos íons com o cátodo. Esses íons também entregam energia quando são neutralizados na superfície catódica. Parte dessa energia é perdida pelo cátodo durante a liberação dos elétrons que mantém o arco e pela neutralização dos íons positivos por elétrons (Silva et al., 2007).

A região anódica, embora seja importante para a continuidade do arco, não é tão fundamental para a manutenção do arco como a zona catódica e, conseqüentemente, não é alvo de tantos estudos. O ânodo não emite íons positivos, assim, na região de queda anódica, há uma maior concentração de elétrons (cargas negativas) que é responsável pelo aparecimento de uma queda de tensão nesta região (Modenesi, 2012).

2.1.1. Fenômeno de Emissão Catódica.

A emissão catódica é o fenômeno responsável pela emissão dos elétrons durante a soldagem. Este fenômeno consiste na emissão dos elétrons a partir dos filmes de óxidos que se formam na superfície do metal base, com a conseqüente destruição desses óxidos (Marques et al. , 2011).

Os elétrons possuem uma relativa facilidade a serem emitidos a partir de camadas de óxidos devido ao fato das ligações elétron-átomos serem normalmente mais fracas nos óxidos do que no metal base (Scotti & Ponomarev, 2014). A figura 2 demonstra o funcionamento do mecanismo de emissão catódica.

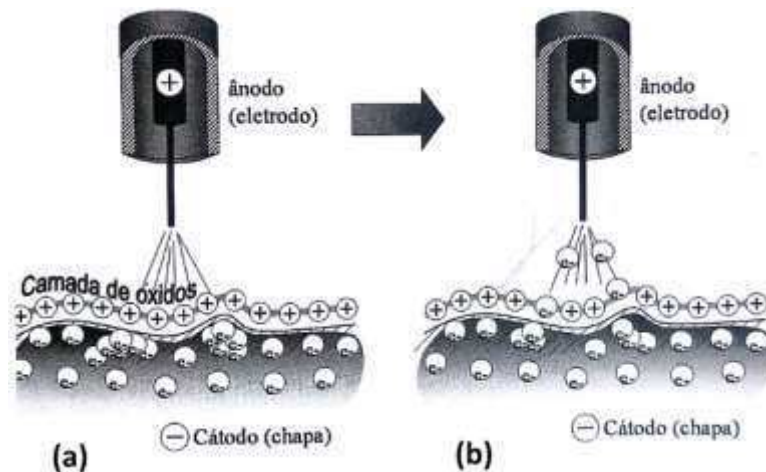


Figura 2- Mecanismo de emissão catódica – (a) formação de camada de óxidos com carga positiva e agrupamento dos elétrons; (b) quebra localizada da camada de óxidos e emissão dos elétrons.

Fonte: adaptado de Modenesi (2012).

Entre a camada de óxidos e o metal base surgem altos níveis de tensão, que resultam no agrupamento de elétrons e em sua aceleração em direção ao anodo, sem que a tensão entre o eletrodo e a chapa atinja valores elevados. Devido a esta aceleração, os elétrons removem localmente a camada de oxido, criando pontos por onde viajam, através da coluna de plasma, até o anodo.

Devido a necessidade da existência de óxidos para que ocorra fenômeno de emissão catódica, é fundamental a adição de pequenas porcentagens de oxigênio à proteção gasosa, o que garante uma melhor estabilidade do processo de soldagem, 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 & Ponomarev, 2014).

Segundo Scotti e Ponomarev (2014), o potencial de oxidação de um gás de proteção é um fator de extrema importância, responsável pela maior ou menor facilidade de emissão de elétrons, assim como maior ou menor tensão do arco.

2.1.2. Coluna de Plasma

A coluna de plasma corresponde à região visível e luminosa do arco, que possui gradientes térmicos e elétricos menores que as regiões catódica e anódica (Marques et al., 2011), e ocupa praticamente todo o comprimento do arco, sendo formada de partículas neutras (moléculas e átomos), íons e elétrons livres. A

formação da coluna de plasma ocorre devido ao aquecimento do meio, formado por gases e vapores metálicos, e como resultado da agitação térmica, ocorrerem choques entre os seus constituintes, gerando elétrons e íons, com posterior ionização (Modenesi, 2012).

Devido a intensa atividade térmica, ocorre a troca de calor entre a coluna de plasma e o meio ambiente. Esta troca de calor ocorre principalmente por radiação e convecção, liberando calor para a atmosfera e o metal base, com resultado ocorre desionização do meio. Assim sendo, para que possa existir um estado energético rico, é necessário que haja uma fonte que forneça calor à coluna de plasma, mas não é necessária uma fonte de calor externa, já que a corrente que atravessa o arco é capaz de gerar calor suficiente para promover a ionização (Scotti & Ponomarev, 2014).

Este calor é gerado a partir do choque entre os elétrons, com elevada energia cinética, e os átomos, que absorvem a energia transferida dos elétrons. Neste caso, quanto maior a quantidade de elétrons se chocando em um mesmo átomo, e maior a capacidade dos mesmo de carregar energia, mais fácil será ionizar o átomo (Modenesi, 2012).

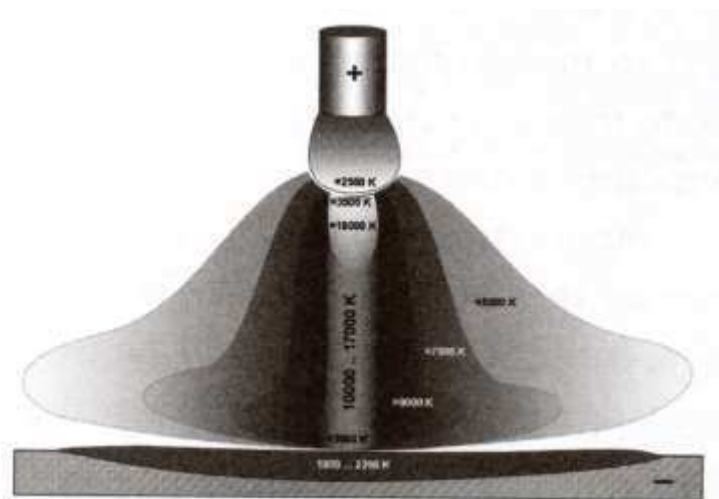


Figura 3 - Perda térmica da coluna de plasma de um arco
Fonte: Scotti e Ponomarev (2014).

Um dos fatores importantes, com relação à manutenção do arco, é a tensão da coluna de plasma. Dependendo dos parâmetros envolvidos no processo, haverá um nível de tensão mínimo para que um determinado arco continue aberto. Caso a fonte não forneça a quantidade necessária de tensão, o

arco se apagará lentamente, no entanto, se a fonte fornecer mais tensão do que o arco demanda, a tensão corresponderá àquela demandada. A tensão da coluna de plasma é função da capacidade de troca térmica com o meio, do potencial de ionização, da corrente e da geometria do arco, mantendo entre si uma relação complexa (Scotti & Ponomarev, 2014).

2.2. O processo GMAW

O processo GMAW consiste na união de peças metálicas através da formação de um arco elétrico entre o metal base e o arame/eletrodo alimentado continuamente. O calor gerado pelo arco elétrico provoca a fusão do arame, que é transferido para a poça de fusão, promovendo a união das peças a soldar (Bracarense, 2003). A região de solda é protegida dos contaminantes presentes no ambiente através de uma atmosfera gasosa, que pode ser composta por um gás inerte, Ar ou He, por um gás ativo, CO_2 , ou por uma mistura desses gases, que pode incluir O_2 e N_2 (Scotti & Ponomarev, 2008).

Na soldagem a arco elétrico, a fusão ocorre de forma localizada. Inicialmente um curto-circuito entre o eletrodo e a peça produz a passagem inicial de uma elevada corrente, com o posterior aquecimento do eletrodo e da região de contato do metal base. O arco se estabelece através deste aquecimento e da ruptura do curto-circuito, provocada pela fusão ocorrida em alguma parte do eletrodo. A fusão do arame continuamente alimentado resulta na formação de gotas que são transferidas para a poça de fusão, e posteriormente formam o cordão de solda (Filho, 2012).

O processo GMAW pode ser utilizado para a soldagem dos principais metais e ligas comerciais como aço carbono, aços inoxidáveis e metais e ligas não ferrosos (Silva, 2010). Para que o processo possa ser utilizado nesta variedade de materiais, é necessário que os gases utilizados na proteção, assim como o arame e os parâmetros da soldagem, sejam adequados ao material que será soldado (Weglowski, 2008). A utilização do processo GMAW ocorre principalmente na forma semiautomática, onde o operador (soldador) é o responsável por conduzir manualmente a tocha, no entanto a utilização de forma totalmente automatizada tem sido empregada na indústria de forma crescente.

Para os dois casos, a alimentação do eletrodo é realizada através de um alimentador mecanizado, e todos os parâmetros e ajustes dos equipamentos são realizados pelo operador (Scotti & Ponomarev, 2008; Teske & Martins, 2008). A figura 4 mostra o procedimento básico de soldagem utilizando o processo GMAW.

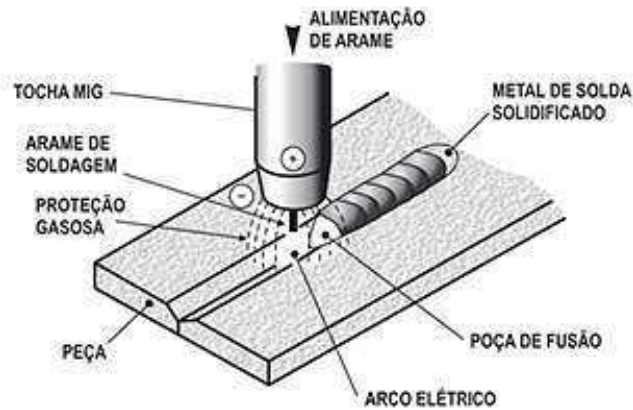


Figura 4 – Processo GMAW
 Fonte : adaptado de Fortes (2005)

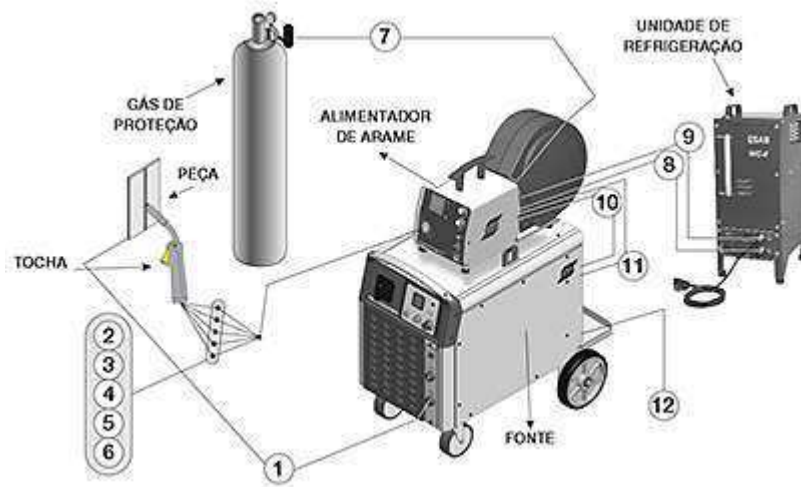
De acordo com Scotti & Ponomarev (2008), Bracarense (2014) e Fortes (2005), as principais vantagens do processo GMAW sobre os demais são:

- Compatibilidade com a maioria dos metais e ligas comerciais;
- Pode ser realizado em praticamente todas as posições;
- Alimentação contínua do eletrodo, que confere maior produtividade;
- Taxas de deposição relativamente elevadas;
- Variação entre os modos de transferência metálica;
- Menores quantidades de fumo e escória em comparação a outros processos;
- Possibilidade de automação;

Porém, como todo processo de soldagem, também apresenta limitações, que dificultam sua aplicação. Algumas delas são:

- Altos custos e complexidade do equipamento;
- Dificuldade de aplicação em locais de difícil acesso;
- Necessidade de proteção contra possíveis correntes de ar, para evitar a dispersão da atmosfera gasosa;
- Altos níveis de radiação e calor;

A figura 5 mostra os equipamentos básicos para a realização de soldagem pelo processo GMAW.



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

Figura 5 - Componentes de um sistema de soldagem do processo GMAW
Fonte: adaptado Fortes (2005).

2.2.1. Variáveis do processo GMAW

As principais características do cordão de solda, como as dimensões, a aparência e as propriedades mecânicas são altamente influenciadas pelas variáveis ligadas ao processo GMAW. Essas variáveis também influenciam a incidência de descontinuidades como trincas, poros, mordeduras e outros (Barbedo, 2011). Dimensões inadequadas do cordão de solda podem resultar na falha da estrutura soldada, assim como a profundidade de penetração determina a capacidade de uma junta soldada de suportar uma determinada carga de tensão (Mostafa & Khajavi, 2006)

O controle das variáveis no processo GMAW é de extrema importância para que se atinja os níveis de qualidade requeridos para uma solda. Devido à correlação existente entre essas variáveis, quando se realiza algum ajuste em uma delas, geralmente torna-se necessário que uma ou mais variáveis também sejam modificadas (Fonseca, 2015).

2.2.1.1. Corrente de Soldagem

Características como taxa de deposição, tipo de transferência metálica e geometria do cordão de solda sofrem influência direta da corrente de soldagem. Visto sua importância, é fundamental que a corrente de soldagem utilizada esteja de acordo com as características desejadas para o cordão de solda, levando em conta fatores como a espessura das peças a serem unidas e o diâmetro do eletrodo utilizado (Barbedo, 2011).

A utilização de uma corrente de baixa intensidade resultará em uma estabilidade reduzida do arco elétrico. Com a elevação do valor da corrente, mantendo constantes os demais parâmetros, ocorrerá uma maior penetração da solda, um aumento da taxa de deposição, do diâmetro da gota de solda até sua transferência à poça de fusão e do reforço do cordão de solda. (Fonseca, 2015).

A velocidade de alimentação do arame no processo GMAW está diretamente relacionada com a corrente de soldagem, sendo assim, qualquer variação que ocorra com a velocidade de alimentação do eletrodo afetará a corrente de soldagem com a mesma intensidade e no mesmo sentido (Alves, 2009). Com o aumento da velocidade de alimentação do arame, para manter o arco com o mesmo comprimento e com a mesma tensão, a quantidade de arame fundido deve ser maior, o que resulta em um aumento do valor da corrente. Este aumento leva a uma maior taxa de deposição e maior quantidade de calor sendo transferida. Como consequência ocorre um aumento da profundidade de penetração, da largura e do reforço do cordão de solda (Giraldo et al., 2009). A figura 6 mostra a relação entre a velocidade de alimentação do eletrodo e a corrente de soldagem para arames de diferentes diâmetros.

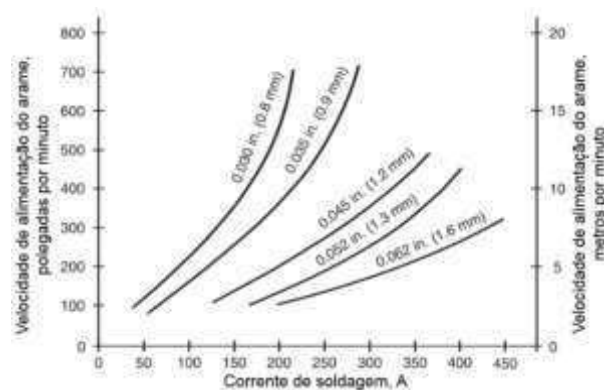


Figura 6 - Relação entre a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame
Fonte: adaptado de Fortes (2005)

2.2.1.2. Tensão

A tensão utilizada durante o processo GMAW altera a geometria do cordão de solda, o modo de transferência metálica, o comprimento do arco, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos gerados.

Menores valores de tensão produzem um arco de tamanho reduzido, o que resulta em uma maior penetração e cordões de solda mais estreitos. No entanto, uma tensão muito baixa pode produzir um cordão estreito e convexo, devido à baixa quantidade de calor transferida para a poça, além de facilitar a ocorrência de porosidade (Fischer, 2011).

Com a elevação da tensão, ocorre o aumento do comprimento do arco, produzindo um cordão de solda mais largo, com menor espessura do reforço e melhor distribuição, conseqüentemente a penetração diminui. Por outro lado, uma tensão alta pode gerar excesso de respingos, porosidade e mordeduras. Em ambos os casos a estabilidade do arco elétrico pode ser prejudicada (Gomes, 2006).

De acordo com Modenesi e Avelar (1997), a estabilidade do arco elétrico tende a aumentar com a elevação da tensão. Contudo, em uma determinada tensão o arco atinge um ponto de máxima estabilidade, a partir do qual, com a elevação da tensão a estabilidade tende a diminuir.

Dutra et al. (1995), analisando a estabilidade do processo GMAW com transferência por curto-circuito, considerando os desvios padrão dos picos de corrente e do tempo médio de curto-circuito, verificaram a existência deste ponto de inflexão a partir do qual valores crescentes ou decrescentes de tensão resultam em menor regularidade, indicando que para cada valor de velocidade de alimentação existe apenas um ajuste de tensão capaz de produzir uma condição de estabilidade máxima.

2.2.1.3. Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem pode ser definida como a taxa linear, segundo a qual o arco se move ao longo da junta de solda. A velocidade de soldagem é um dos fatores que alteram a profundidade de penetração do arco. Na soldagem

a arco elétrico, a profundidade de penetração é diretamente proporcional ao valor da corrente de soldagem e inversamente proporcional a velocidade de soldagem, sendo assim, a profundidade de penetração é maior para baixas velocidades de soldagem e diminui conforme esta aumenta (Giraldo et al., 2009).

Porém, Scotti e Ponomarev (2014) atentam para o fato do processo GMAW possuir um comportamento diferente, devido ao efeito de sobreposição da poça. Para velocidades de soldagem baixas, a quantidade de material fundido depositado em uma determinada área aumenta, as dimensões da poça de fusão se tornam maiores e o arco passa a agir diretamente na poça e não sobre a peça, diminuindo a profundidade de penetração. No entanto, para velocidades de soldagem muito altas, ocorre a redução da quantidade de calor transferida para a peça diminuindo a profundidade de penetração, podendo ocasionar mordeduras ao longo do cordão de solda (Nogueira, 2015). A figura 7 mostra os efeitos da energia imposta e da sobreposição da poça sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente.

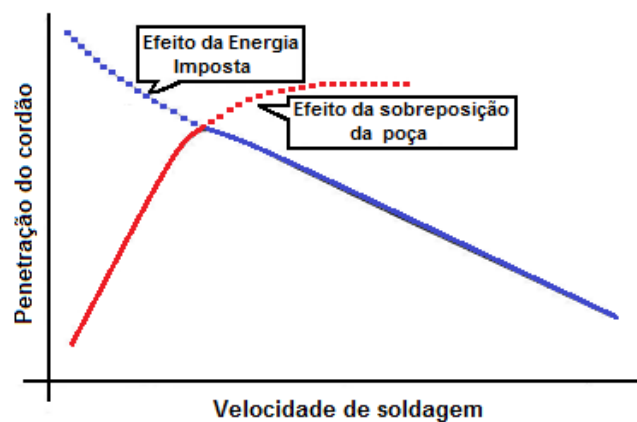


Figura 7 - Efeito da velocidade de soldagem sobre a profundidade de penetração do cordão de solda
Adaptado de SCOTTI & PONOMAREV (2014)

2.2.1.4. Extensão livre do eletrodo

A extensão livre do eletrodo, ou stick-out, corresponde a distância entre a ponta do eletrodo não fundido e o bico de contato. A variação do stick-out influencia a geometria do cordão de solda, sendo mantidas as demais variáveis

do processo, seu aumento reduz a corrente de soldagem e por consequência a penetração e a zona fundida do cordão de solda (Nogueira, 2015).

O aumento do stick-out acarreta em uma maior resistência elétrica do eletrodo, gerando um maior aquecimento por efeito Joule. Com esta elevação da temperatura do eletrodo, será necessária uma menor corrente para fundir o eletrodo para a mesma taxa de alimentação, ou seja, para a mesma corrente de soldagem utilizada se obterá uma maior taxa de deposição, porém com menor penetração (Dobignies, 2008).

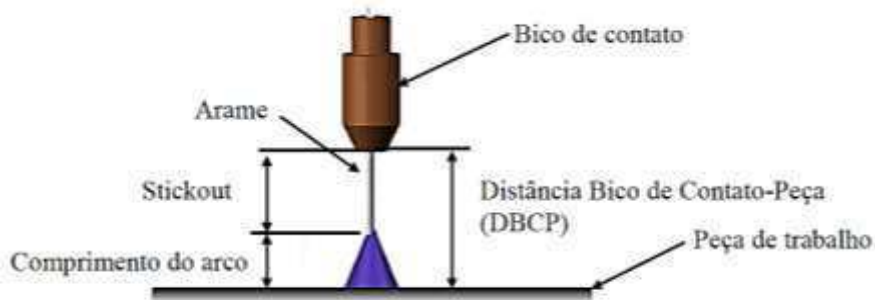


Figura 8 - Representação esquemática da extensão livre do eletrodo (stick-out)
Adaptado de Fisher (2002)

O controle do stick-out é realizado através da distância entre o bico de contato e a peça (DBCP). Quando, por exemplo, se aumenta a DBCP, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, inclusive a velocidade de alimentação, há uma diminuição do valor da corrente, pois há um aumento do comprimento energizado do eletrodo, apesar do comprimento do arco ficar praticamente o mesmo. Para compensar esta queda de corrente, é necessário um aumento na velocidade de alimentação do arame, o que resultará em uma elevação na taxa de deposição do metal de solda (Cayo, 2008). A figura 9 apresenta a relação entre a extensão do eletrodo e a taxa de deposição durante a soldagem.

Extensão (mm)	12	18	25	25
Alimentação Arame (mm/min)	5,8	5,8	5,8	8,4
Corrente (A)	350	320	280	350
Taxa Deposição (kg/h)	4,7	4,7	4,7	6,5

Figura 9 – Extensão do eletrodo e taxa de deposição
Adaptado de Forte (2005)

Eletrodos de grande extensão resultam em um excesso de metal de solda, sendo depositado de forma inconsistente devido ao baixo calor do arco (Barbedo, 2011). Adicionalmente, uma grande extensão pode causar uma geometria inconsistente do cordão de solda, uma baixa profundidade de penetração, uma diminuição da estabilidade do arco e a redução da eficiência da proteção gasosa. (Silva, 2010).

2.3. Gases de Proteção

O processo GMAW utiliza um fluxo gasoso, em torno do metal base e do eletrodo, formado por gases denominados gases de proteção, com a intenção de minimizar os efeitos do ambiente sobre o metal de adição durante a soldagem. Dentre as principais funções dos gases de proteção se destacam a proteção da poça de fusão da interação com o ar atmosférico, a estabilização do arco elétrico e a possível adição de alguns elementos de liga no metal de solda (Invernizzi, 2017).

Os gases de proteção também exercem grande influência sobre as características do arco elétrico, no tipo de transferência de metal, nas velocidades de soldagem, nas perdas por projeções (respingos), na penetração e na forma externa da solda (Barbedo, 2011).

O gás de proteção a ser utilizado no processo GMAW deve ser escolhido com base em sua eficiência na proteção do arco, na qualidade do metal depositado, na estabilidade do arco, na geometria do cordão de solda e nas propriedades mecânicas da solda (Sábio, 2007).

A eficiência de proteção do gás, depende da capacidade do sistema de excluir do ambiente gases que sejam nocivos para a qualidade da solda. Além do tipo de gás utilizado, também influenciam na proteção da soldagem a configuração da tocha e da junta, a vazão do gás de proteção e a incidência de correntes de ar que possam comprometer o fluxo gasoso (Scotti e Ponomarev, 2014). A figura 10 mostra os principais efeitos dos gases de proteção sobre o processo GMAW e o cordão de solda depositado.

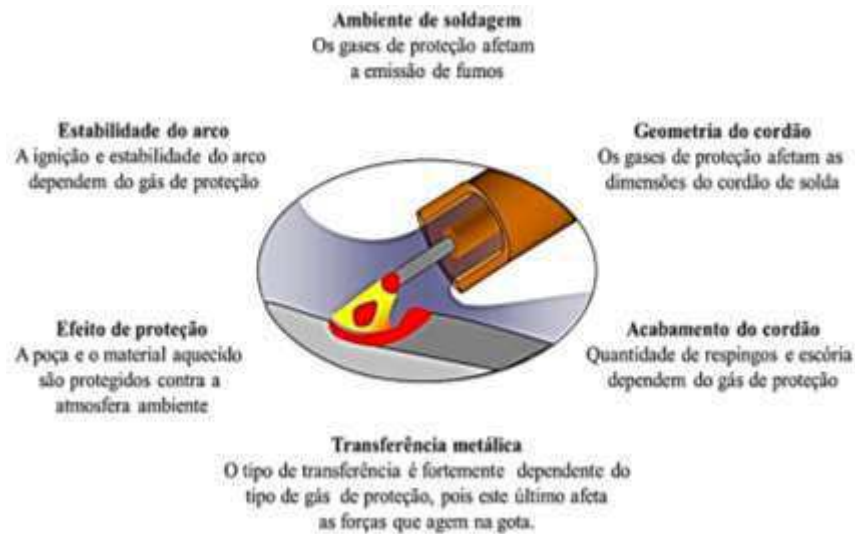


Figura 10 – Principais efeitos dos gases de proteção no processo GMAW

A contaminação durante a soldagem é causada principalmente por nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor de água (H_2O) presentes no ambiente. Nos aços carbono o N_2 absorvido forma nitretos fragilizantes, diminuindo a ductilidade e a tenacidade do aço, podendo causar fissurações e, caso absorvido em grandes quantidades, causa porosidade no cordão de solda. O oxigênio possui grande reatividade com diversos elementos que compõem as mais variadas ligas. No caso dos aços, pode facilmente se combinar com o carbono, formando CO e CO_2 que, caso não sejam liberados durante a solidificação, ficam retidos no cordão de solda e causam porosidade. O oxigênio pode ainda reagir com outros elementos nos aços, como Al , Si e Mg , gerando óxidos que agem como pontos de fragilidade. O hidrogênio apresenta grande solubilidade nos aços. Quando absorvido ocasiona a formação de poros, e caso fique retido, pode criar tensões que resultam defeitos conhecidos como trincas pelo hidrogênio (Bracarense, 2003; Fortes, 2005; Nadzam et al., 2011; Scotti e Ponomarev, 2014).

2.3.1. Propriedades físicas e químicas dos gases de proteção

As propriedades físicas e químicas dos gases como potencial de ionização, condutividade térmica, potencial de oxidação, tensão superficial,

densidade, entre outras, definem as principais características operacionais do arco elétrico e as propriedades do cordão de solda. Alterações em parâmetros como tensão e corrente, entre outros, modifica a geometria do cordão de solda, e são bastante influenciados pela composição do gás de proteção (Golçaves et al., 2012).

Na seleção do gás de proteção é importante observar as características mecânicas e geométricas esperadas após a soldagem, e mesmo que estas características dependam em grande parte do material de adição, a escolha incorreta do gás de proteção pode influenciar estas características (Cardoso et al., 2015).

2.3.1.1. Potencial de Ionização

O potencial de ionização é a energia, expressa em elétron-volts, necessária para a remoção do elétron de menor força da camada de valência de um átomo ou molécula, e colocá-lo em um estado de repouso em uma distância infinita, o que resulta na ionização da gás, conferindo a capacidade do mesmo conduzir eletricidade (Nogueira, 2015).

Um gás que apresente um baixo potencial de ionização, como o argônio, pode transformar átomos em íons facilmente, necessitando de uma menor tensão de soldagem, o que ajuda a manter um arco suave e estável (Groetelaars e Scotti, 2007). A tabela 1 mostra o potencial de ionização dos gases mais utilizados no processo GMAW.

Tabela 1 - Potencial de ionização dos gases de proteção mais utilizados em soldagem.

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

Gás	Ar	CO ₂	He	H ₂	N ₂	O ₂
PI (eV)	15,8	14,4	24,6	13,5	14,5	13,2

A complexa atmosfera formada ao redor do arco elétrico é composta pelos gases de proteção e pelos vapores metálicos gerados durante a soldagem. Sendo assim, o potencial de ionização desses vapores metálicos também afeta a condução de corrente. A abertura do arco, a capacidade do arco em conduzir

corrente elétrica e a sua estabilidade são determinados de acordo com a facilidade de ionização destes elementos (Tatagiba et al., 2012).

2.3.1.2. Densidade

A densidade possui grande importância na proteção do arco elétrico e da poça de fusão, pois interfere na velocidade e no perfil de escoamento dos gases (Morales et al., 2006). Gases mais densos possuem maior eficiência de proteção e necessitam de menor vazão. Por outro lado, gases menos densos precisam de uma maior vazão para promover uma adequada proteção durante a soldagem (Liskevych, 2010).

Esse comportamento, no entanto, fica restrito à soldagem na posição plana. Para a soldagem na posição sobrecabeça, gases de menor densidade tendem a ser mais eficientes na proteção da soldagem (Scotti e Ponomarev, 2014). A tabela 2 mostra a densidade dos gases utilizados no processo GMAW.

Tabela 2 – Densidades dos gases de proteção do processo GMAW
Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

Gás	Símbolo químico	Densidade (Kg/m³)
Argônio	Ar	1,784
Dióxido de carbono	CO ₂	1,977
Hélio	He	0,1785
Hidrogênio	H ₂	0,0898
Nitrogênio	N ₂	1,192
Oxigênio	O ₂	1,333

2.3.1.3. Condutividade Térmica

A condutividade térmica é a capacidade que um gás possui de conduzir o calor gerado pelo arco, para a peça ou para o ambiente (Liskevych, 2010). A condutividade térmica do gás afeta tanto a estabilidade do arco quanto a quantidade de calor transferida para a peça, sendo que, quanto maior a condutividade térmica, maior será a tensão necessária para manter o arco elétrico

(Invernizzi, 2017). A figura 11 mostra a condutividade térmica dos gases utilizados no processo GMAW.

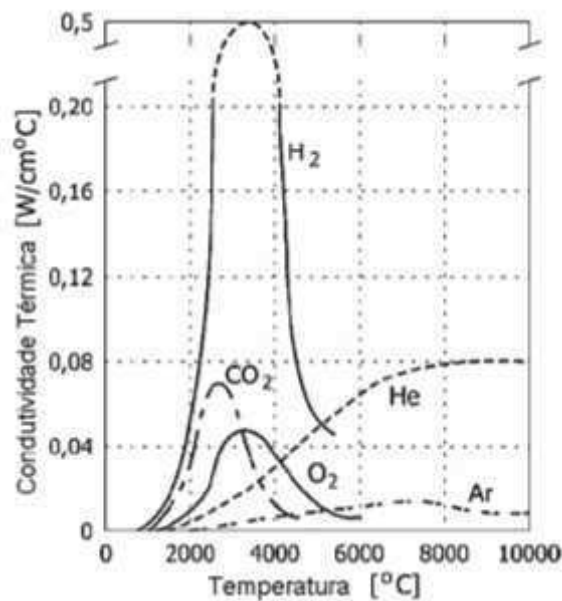


Figura 11 – Condutividade térmica dos gases no processo GMAW
Fonte: (Morales et al., 2006)

Pode se observar que em altas temperaturas o He possui a maior condutividade térmica, transferindo uma maior quantidade de calor à solda. Esta propriedade também confere ao He a capacidade de produzir um arco com uma distribuição mais uniforme de energia térmica, com maior penetração do cordão de solda e aceitando uma maior velocidade de soldagem (Resende, 2006).

Quando se utilizam gases de baixa condutividade térmica como o argônio, que apresenta um elevado gradiente de temperatura entre a região central do arco e a região periférica, o cordão de solda produzido possui um perfil de penetração centralizado (Teske, 2006).

Gases como He ou CO₂, que possuem uma alta condutividade térmica, apresentam menor gradiente de temperatura, relativamente ao argônio, gerando uma distribuição mais uniforme do calor no sentido radial da coluna de plasma, garantindo um perfil de penetração melhor distribuído (Farias et al., 2002). A figura 12 mostra os perfis de penetração para a soldagem com diferentes proteções gasosas

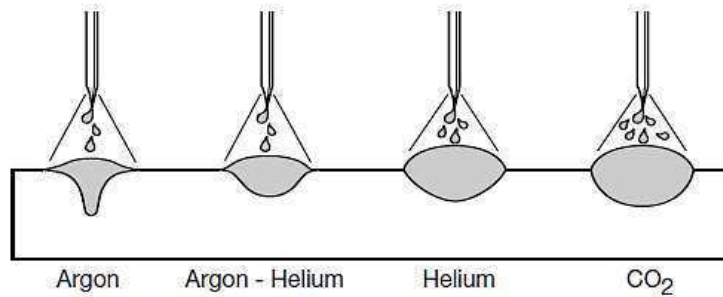


Figura 12 – Perfis de penetração dos gases de proteção no processo GMAW
Fonte: Nadzam (2011)

A condutividade térmica do gás é um fator muito importante na soldagem de metais altamente condutores, como o alumínio e o cobre, isto é, metais que cedem calor muito rapidamente para o ambiente. Nesses casos é importante a utilização de gases que apresentem elevada condutividade térmica, a fim de se obter uma velocidade adequada de soldagem, além de evitar problemas como falta de fusão e baixa penetração (Groetelaars, 2007).

2.3.1.4. Potencial de oxidação

O potencial de oxidação é a capacidade do gás de proteção em oxidar o metal durante a soldagem. Esta propriedade do gás é muito importante, visto que é necessário recuperar a camada superficial de óxido que é destruída pela emissão de elétrons durante o processo de emissão catódica (Kah & Martikainen, 2013).

Entre os gases de proteção, os gases oxidantes mais utilizados pela indústria são o CO_2 , CO_2+Ar e CO_2+O_2 . Em geral, as soldagens que utilizam esses gases apresentam uma substancial perda de elementos de liga e impurezas no metal fundido devido a interação com o oxigênio (Westin, Olsson, e Hertzman, 2008).

O potencial de oxidação influencia a aparência do cordão de solda, a sua dureza e resistência, a quantidade da escoria e óxidos formados, a emissão dos fumos, a fluidez da poça de fusão e o tamanho das gotas durante a transferência (Filho e Ferraresi, 2008).

O nível do potencial de oxidação pode causar transtornos durante a soldagem. Um baixo potencial de oxidação reduz a estabilidade do arco e a molhabilidade, favorecendo a formação de cordões irregulares e convexos. Isto

pode ser evitado adicionando pequenas quantidades de oxigênio à mistura gasosa, o que melhora a molhabilidade, produzindo cordões de solda mais uniformes e com menor incidência de mordedura. Por outro lado, um alto potencial de oxidação pode causar poros, fragilização do metal de solda, perda de elementos de liga, aumento na quantidade de fumos e alteração das propriedades mecânicas (Scotti e Ponomarev, 2014).

Os gases CO₂ e O₂, quando presentes na mistura gasosa, aumentam a quantidade de oxigênio presente e o potencial de oxidação passa a se relacionar com a porcentagem volumétrica dos mesmos na mistura (Golçaves, 2012). O potencial de oxidação então pode ser estimado pela equação a seguir:

$$PO = \%O_2 + \frac{1}{2}(\%CO_2)$$

O potencial de oxidação do CO₂ em misturas gasosas corresponde à metade do potencial de oxidação do O₂ na mistura gasosa. Isto implica na utilização de misturas com menores teores de O₂ em relação ao CO₂. A quantidade de oxigênio normalmente adicionada em misturas comerciais é de no máximo 8%, visando benefícios adicionais (Tatagiba, 2015).

2.3.2. Gases de proteção utilizados no processo GMAW

Os gases de proteção, segundo sua natureza e composição, têm uma grande influência nas características do arco, no modo de transferência metálica, na velocidade de soldagem, na geração de respingos, na penetração e no formato e aparência do cordão de solda (Campos, 2005). Dentre os gases mais utilizados no processo GMAW, destacam-se o argônio (Ar) e o dióxido de carbono (CO₂), que serão abordados neste trabalho.

2.3.2.1. Argônio (Ar)

O Ar é um gás incolor, inodoro, insípido, monoatômico e é um dos gases inertes da última coluna da tabela periódica. Isto significa que não reage com

outros elementos para formar compostos. O Ar é obtido da atmosfera, embora a quantidade deste seja somente de 0,934% na mesma, sendo facilmente separado como um subproduto, durante a produção em larga escala do oxigênio e nitrogênio puro, estando este disponível a um custo modesto (Tusek & Suban, 2000).

O Ar é um dos gases mais utilizados no Processo GMAW. Possui um potencial de ionização relativamente baixo (15,75v) e é cerca de 1,4 vezes mais denso do que o ar atmosférico. Estas características permitem uma abertura fácil do arco, mesmo quando são utilizados baixos valores de corrente de soldagem, e propicia maior eficiência da proteção gasosa, com baixos valores de vazão, sobretudo na posição plana (Cirino, 2009).

O Ar é normalmente empregado puro na soldagem de materiais não ferrosos como ligas de alumínio, níquel, cobre e materiais reativos que incluem o zircônio, titânio e tântalo. No caso de metais ferrosos, como aços, o Ar é normalmente misturado com outros gases como o oxigênio, hélio, hidrogênio, dióxido de carbono e/ou nitrogênio (Fortes, 2005).

Por ser um gás inerte, a proteção à base de argônio promove retenção de elementos de liga no cordão de solda, deixando o cordão de solda livre de inclusões, melhorando as propriedades mecânicas. Além disso, sua utilização em misturas com a adição de gases oxidantes, como o O₂ e o CO₂, contribui para a formação de filmes de óxidos, facilitando o processo de emissão catódica (Rao, et. al., 2010).

2.3.2.2. Dióxido de Carbono (CO₂)

O CO₂ é um dos gases mais utilizados no processo GMAW, o que se deve ao seu baixo custo, sendo geralmente aplicado na soldagem de aços carbono. No entanto sua utilização é limitada devido a elevada quantidade de respingos gerada, perda por oxidação, geração de porosidade e as limitadas quantidades de posições de soldagem em que pode ser utilizado (Mukhopadhyay & Pal, 2006).

O CO₂ é relativamente inerte à temperatura ambiente, mas devido as altas temperaturas geradas pelo arco elétrico, se dissocia formando monóxido de

carbono (CO) e oxigênio (O₂). O oxigênio proveniente dessa dissociação reage com o material fundido, produzindo uma camada de óxido, que contribui para a maior estabilidade do arco. A oxidação da poça de fusão limita a ação das manchas catódicas sobre áreas adjacentes à poça de fusão, pois os óxidos estão presentes diretamente sobre a mesma (Bracarense, 2003).

Devido a sua elevada condutividade térmica, o CO₂ transfere uma grande quantidade de calor durante a soldagem, o que resulta em boa velocidade de soldagem e uma maior profundidade de penetração. No entanto, essa elevada condutividade gera um núcleo de condução do arco de pequeno diâmetro, tornando o arco mais constricto, provocando uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, aumentando não somente a penetração, mas também o reforço e diminuindo a largura do cordão de solda. A ocorrência de um núcleo de condução do arco de pequeno diâmetro também aumenta a perturbação da superfície da poça metálica fundida prejudicando a estabilidade do arco e gerando a formação excessiva de respingos (Baixo & Dutra, 1995; Gomes, 2006).

2.3.3. Misturas gasosas utilizadas no processo GMAW

O gás de proteção possui suas características específicas, afetando de forma característica o cordão de solda. A forma como os gases afetavam individualmente a soldagem serviu de incentivo para estudos com misturas gasosas que objetivavam reunir as características desejadas dos diferentes gases de proteção em um único composto.

Tatagiba (2015) lista uma série de trabalhos científicos que estudaram o efeito de misturas gasosas, frisando que apesar da pouca inovação científica dos gases de proteção, em comparação com equipamentos de soldagem, este tipo de estudo vem sendo realizado desde a década de 60. A tabela 3 apresenta as misturas gasosas estudadas ao longo dos anos e um resumo dos respectivos resultados obtidos.

Tabela 3 – Formulações de gases para proteção no processo GMAW

Fonte: Tatagiba (2015)

Ano	Gás de Proteção	Resultados
1960	Ar/He 1-20%CO ₂ /CO	Material: aço carbono (<0,35%C). Obtenção de um cordão de solda muito liso e uniforme. Particularmente quando é adicionado CO ₂ à mistura.

1964	Ar e/ou He. 20-70% CO ₂ /CO 1-15% O ₂		Material: aço carbono. Formação de uma poça de solda que associa a boa penetração fornecida pelo gás CO ₂ com a boa largura de cordão fornecida pelo Ar.
1970	He 40-60%Ar 1-15%CO ₂	Ar 1-15%CO ₂ 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 ₂ 0,25- 1%O ₂		Material: aço carbono. Solda livre de escória e com uma superfície mais limpa.
1988	71-83%Ar 16%-25% He 1-4%CO ₂		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.
1989	He 3-8%CO ₂ 30-40%Ar		Material: aço carbono. Melhorou a deposição sobre o metal base em virtude da transferência metálica ser por spray.
1990	Ar 0,5-1,25%CO ₂ 30-40%He		Material: aço carbono, aço inoxidável, metais não ferrosos. Produz uma solda com aparência superior à 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 ₂ 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.
1992	Ar 0,1-0,9%CO ₂ 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.
1996	Ar 2-20%O ₂		Material: aço carbono, aço inoxidável. A adição de O ₂ 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 ₂ 1%O ₂		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		Material: aço carbono, aço inoxidável. O arco de soldagem apresenta-se bastante instável. A solda não tem molhabilidade adequada e são produzidas descontinuidades.
	Ar CO ₂ O ₂		Material: aço carbono, aço inoxidável. O ₂ 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 ₂ aumentaram as emissões de fumos de soldagem.
2002	Ar 0,01-1,80%O ₂ 20-98,2% He		Material: Al e suas ligas. Transferência por spray, sem corrente pulsada. Proporciona uma elevada produtividade devido à velocidade 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 ₂ 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.
2009	97.5% Ar 2.5% CO ₂	82% Ar 18% CO ₂	Material: aço carbono. Com o aumento da porcentagem de CO ₂ no gás de proteção, se verificou o aumento na penetração da solda e a diminuição na quantidade de inclusões.
	90% Ar 10% CO ₂	75% Ar 25% CO ₂	

2009	Ar 1%O ₂	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).
2010	Ar 20-30%CO ₂ 12-15%O ₂	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.

2.3.3.1. Misturas Ar-CO₂

Misturas Ar-CO₂ são as mais utilizadas na soldagem dos aços ao carbono e de baixa-liga pelo processo GMAW. Em seu estudo Haidar e Lowke (1997), observaram que a adição de CO₂ ao Ar aumenta o potencial de oxidação, o que contribui para o fenômeno de emissão catódica nas soldagens de materiais ferríticos. Porém, segundo Soderstrom e Mendez (2008), o aumento de teor de CO₂ reduz a produtividade da soldagem devido à maior geração de respingos.

Scotti e Ponomarev (2014) relatam que a adição do CO₂ ao Ar melhora a geometria e a penetração do cordão de solda, gerando um perfil de penetração mais distribuído e uma zona fundida de maior tamanho. O CO₂ ainda possui uma densidade maior que a do Ar e a do ar atmosférico, sendo assim, quando adicionado ao Ar, aumenta a capacidade de proteção do gás, tornando-o mais resistente às correntes de ar, principalmente na posição plana.

Moreira et al., (2012) constataram em seu estudo que adições de até 25% de CO₂ ao Ar alteram substancialmente a geometria do cordão de solda, aumentando a largura e a profundidade de penetração e diminuindo a altura. O estudo também mostrou que não houve alteração da taxa de deposição e que a dureza do metal de solda sofreu uma sensível elevação.

Soderstrom e Mendez (2008) em seu estudo mostram que quando a quantidade de CO₂ se eleva, ocorre uma mudança na forma de destacamento das gotas, com a formação de gotas cada vez maiores. Maiores porcentagens de CO₂ aumentam a densidade de corrente e diminuem a mancha anódica na gota em formação. A pressão concentrada do plasma em uma área pequena da gota pode resultar em força suficiente para levantar a gota, provocando o seu deslocamento

na ponta de eletrodo. A Figura 13 esquematicamente mostra como o aumento de CO₂ na mistura altera a transferência da gota.

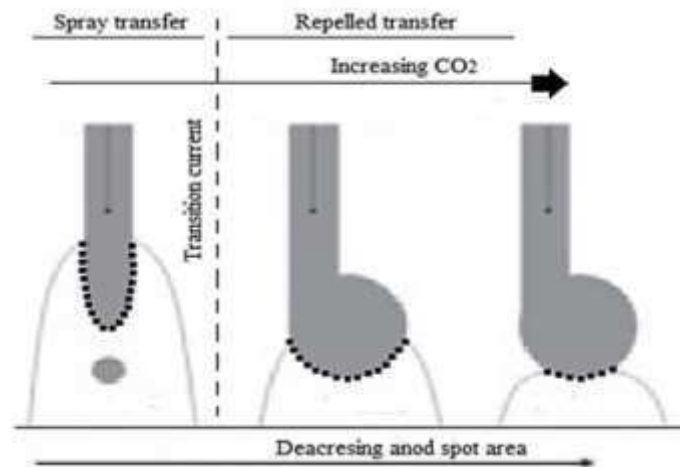


Figura 13 - Efeito do aumento do teor do CO₂ sobre o destacamento da gota
Fonte: Soderstrom e Mendez (2008)

2.3.4. Propileno

O propileno é um hidrocarboneto insaturado de formulação química C₃H₆, que se apresenta na forma um gás, sendo incolor e altamente inflamável em temperatura ambiente. Apesar de não ser caracterizado como tóxico, o propileno é um gás asfixiante devido a sua capacidade de deslocar o oxigênio diminuindo sua concentração no ar atmosférico, tornando perigosa sua utilização em ambientes fechados (AIR LIQUIDE, 2010; White Martins Praxiar, 2011).

O acondicionamento do propileno é feito na forma liquefeita e os seus usos 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 (AIR LIQUIDE, 2010; Ribeiro, 2016).

O fato de ser um hidrocarboneto caracteriza uma das principais vantagens de sua utilização no processo GMAW. Hidrocarbonetos, presentes em seu estado gasoso, tornam-se altamente instáveis quando submetidos a pressões elevadas, tendendo a se decompor na forma de seus elementos básicos, carbono e hidrogênio, em um processo semelhante a combustão do gás, mas sem a presença de oxigênio, liberando uma grande quantidade de energia na forma de calor (Ribeiro, 2016).

Outra característica importante é que durante a sua decomposição, o propileno libera uma quantidade duas vezes maior de hidrogênio em relação ao carbono. Esta maior proporção de hidrogênio contribui para a produção de um cordão de solda de maior qualidade, pois o hidrogênio atua dificultando a formação de óxidos, o que evita que a mistura gasosa apresente um potencial de oxidação demasiadamente elevado, produzindo um arco mais estável (Ramalho, 2008)

2.3.5. Comportamento dos gases moleculares em elevadas temperaturas

Em elevadas temperaturas, os gases moleculares sofrem reações de dissociação de ionização, que alteram severamente a estrutura química dos gases, em comparação com seu estado em baixas temperaturas, o que altera a forma com a energia deve ser considerada.

Em seu trabalho, Modenesi (2012) mostra que a dissociação e a ionização dos gases moleculares são reações endotérmicas, absorvendo energia em seu sentido direto, e liberando energia em seu sentido inverso quando ocorre a associação. A energia vibracional, em elevadas temperaturas, apresentada pelas moléculas que compõe o gás tende a aumentar, podendo chegar ao ponto de causar a ruptura das ligações, resultando na dissociação. Em temperaturas extremas, os elétrons da camada mais externa podem ser expulsos, levando à ionização das moléculas.

Este processo também é explicado por Fischer (2011), de forma que gases moleculares ionizados tem íons livres. Estes íons, em temperaturas mais baixas, podem se recombinar, formando o composto original, e liberando energia adicional na forma de calor.

Moreira (2008) mostra que, a ionização do gás resulta em um processo endotérmico, que absorve energia do arco voltaico, e ao se deparar com o metal base, o processo é revertido, com os íons e elétrons se recombinando, formando o composto original e liberando energia na forma de calor para a poça de fusão.

Os hidrocarbonetos, em seu estado original, se tornam altamente instáveis quando submetidos a elevadas temperaturas, e se decompõe em seus elementos básicos, que são o carbono e o hidrogênio. Este processo é similar a combustão,

porém sem a presença de O_2 , liberando uma grande quantidade de calor (Rodrigues, 1994).

Ramalho (2008) em seu trabalho sobre oxicorte mostra a energia de dissociação de alguns carbonetos durante a combustão. O autor mostra que para se atingir maiores temperaturas da chama são necessárias quantidades específicas de O_2 . A figura mostra as reações de combustão envolvendo o C_3H_6 .

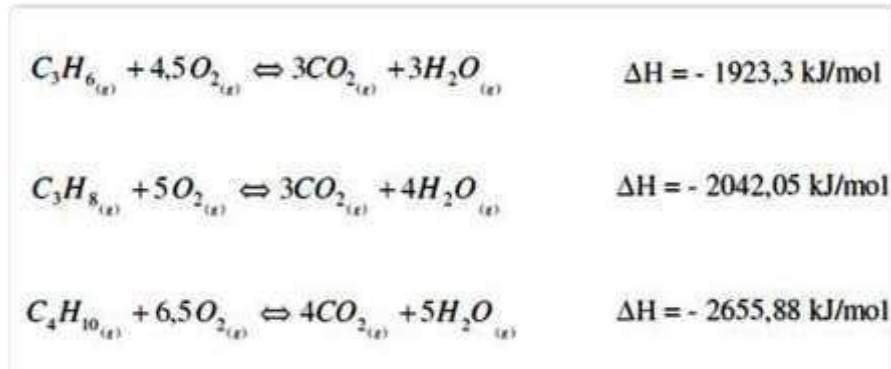


Figura 14 – Reações de combustão envolvendo o C_3H_6

2.4. Transferência Metálica

A American Welding Society (AWS, 1994) define a transferência metálica como a maneira pela qual o metal fundido é transferido da ponta do eletrodo para a poça de fusão. No processo GMAW essa transferência ocorre pela formação de gotas, através da coluna do arco, geradas na ponta do eletrodo, que possuem dimensões, tempo de crescimento e frequências de destacamento características (Bracarense, 2007).

Segundo Modenesi (2012), a transferência metálica no processo GMAW é influenciada por fatores como os parâmetros elétricos relacionados ao arco (corrente, tensão e polaridade), o diâmetro e composição do metal de adição, tipo e composição do meio de proteção, comprimento do eletrodo e pressão atmosférica. O modo como a transferência metálica ocorre no processo GMAW também afeta fortemente características como a estabilidade do processo, a quantidade de gases absorvidos pelo metal, a quantidade de respingos gerados, a aplicação da soldagem em determinadas posições, a geometria e a aparência do cordão de solda.

2.4.1. Modos de transferência metálica no processo GMAW

O modo de transferência, basicamente, é o comportamento que a gota demonstra durante a sua transferência para a poça de fusão. Diversas formas de transferência podem ser observadas no processo GMAW.

Scotti e Ponomarev (2014) sugerem uma divisão dos modos de transferência em classes, sendo que se distinguem três classes de modos de transferência diferentes: naturais, controlados e intercambiáveis. A figura 15 mostra a divisão dos modos de transferência metálica do processo GMAW.

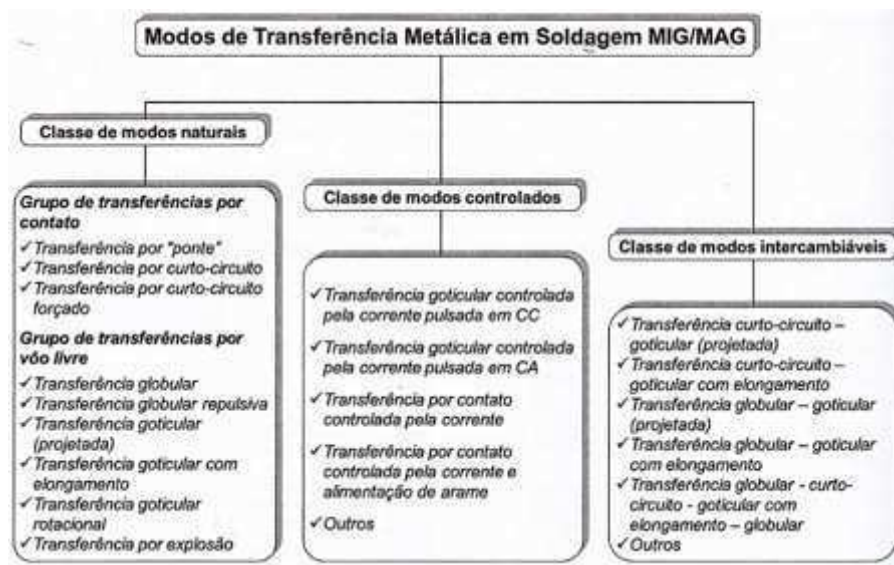



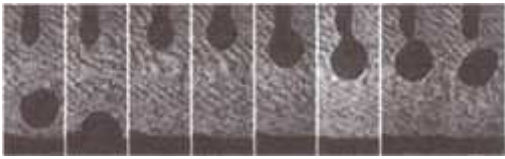



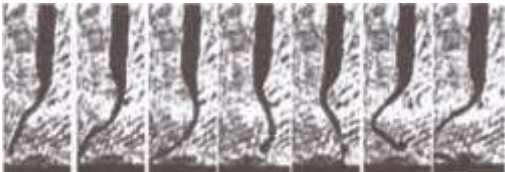



Figura 15 – Modos de transferência metálica em soldagem GMAW

Entre as classes de modos, destaca-se a classe dos modos naturais, que são aqueles que ocorrem de forma espontânea, sendo os mais empregados em situações usuais de soldagem, e, por isso, são os maiores alvos de pesquisas, com objetivo de estudar os mecanismos e os princípios físicos que as regem (Motta, 2002).

Os modos transferências da classe natural se dividem em dois grupos, de acordo com o mecanismo que apresentam. No primeiro grupo, denominado de transferência por contato, onde o destacamento só ocorre após a gota tocar a poça de fusão. No segundo grupo, denominado transferência por voo livre, o destacamento da gota ocorre antes do contato desta com a poça de fusão (Scotti e Ponomarev, 2014). A tabela 4 mostra os modos de transferência naturais que ocorrem no processo GMAW:

Tabela 4: Modos de transferência naturais

Grupo de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por contato	Curto-circuito		Tensão superficial e efeito pinch
	Ponte		Tensão superficial
	Curto-circuito forçado		Efeito pinch pronunciado
Por voo livre	Globular		Gravitacional
	Globular repulsiva		Forças gravitacional e de repulsão
	Goticular		
	Goticular com alongamento		Força eletromagnética
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Força eletromagnética e reações químicas

No processo GMAW, considera-se três modos de transferência metálica como os principais: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência goticular (spray). A Figura 16 mostra os campos operacionais das principais formas de transferência metálica. Neste caso o argônio foi utilizado como gás de proteção. Pode-se observar que a transferência por curto-circuito é estável para baixos valores de tensão numa ampla faixa de corrente. A transferência globular ocorre para maiores valores de tensão e para correntes mais baixas. A transferência spray ocorre para valores maiores de tensão e de corrente (Modenesi, 2012).

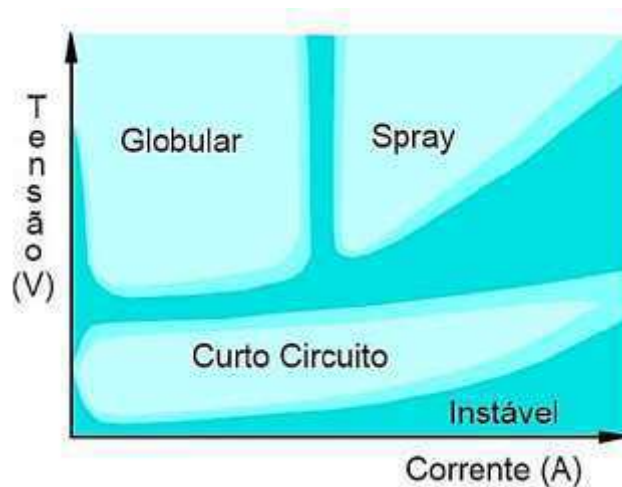


Figura 16 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio

Durante a soldagem, a predominância de uma ou de outra forma de transferência vai depender dos parâmetros e das variáveis desse processo. Algumas particularidades serão discutidas a seguir, buscando-se destacar as aplicações de cada uma das formas de transferência (Motta, 2002).

2.4.2. Forças que governam a Transferência Metálica

A gota de metal fundido, durante todo o seu processo de formação, fica submetida a uma série de forças que podem atuar a favor ou contra o seu destacamento. As forças estáticas que atuam sobre a gota são: Força gravitacional (F_g), força eletromagnética (F_{em}), força devido à tensão superficial do

metal fundido (F_y), força de arraste dos gases (F_a) e força de vaporização (F_v) (Scotti e Ponomarev, 2014).

A figura 17 esquematiza o modo como essas forças atuam sobre a gota durante o seu destacamento. A gota só será transferida se o somatório das forças de destacamento superar o somatório das forças de retenção, que ocorrerá quando:

$$F_{em} + F_g + F_a > F_y + F_v$$

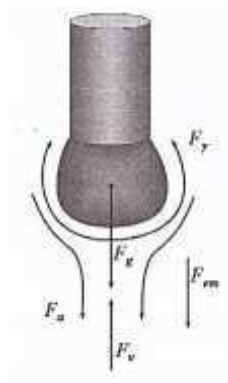


Figura 17 – Forças governantes na transferência metálica no processo GMAW
Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

2.4.2.1. Força Gravitacional (F_g)

A força gravitacional (F_g) é resultante da ação da gravidade, e como esta depende da massa, é influenciada pela dimensão e densidade do material da gota. Dependendo da posição de soldagem esta força pode favorecer ou dificultar a transferência do metal. Quando a soldagem ocorre na posição plana F_g atua favorecendo o destacamento, no entanto na soldagem na posição sobrecabeça a força é oposta ao destacamento. Outra característica importante é o fato da força gravitacional continuar a agir sobre a gota mesmo depois de seu destacamento (Modenesi, 2012; Pessoa, 2007).

Considerando somente a componente desta força paralela ao eixo do arame, e assumindo a gota como uma esfera, temos a equação:

$$F_g = \frac{\pi}{6} d^3 \rho g$$

Onde:

d é o diâmetro da gota

ρ a densidade do metal líquido

g a aceleração da gravidade

2.4.2.2. Força associada a Tensão Superficial (F_y)

A força associada à tensão superficial (F_y) age mantendo a gota do material fundido presa ao eletrodo, tendo o sentido voltado para o interior da gota. A interface entre dois meios apresenta uma fina camada formada de poucos átomos, que possuem uma energia livre superficial maior do que os átomos no interior dos volumes. A tensão superficial é resultado dessa diferença de energias e a força a ela associada pode ser definida como (Modenesi, 2012):

$$F_y = 2\pi r \gamma$$

Onde:

r é o raio da gota

γ é a energia livre de superfície

A medida que o eletrodo se funde, o volume da gota aumenta, enquanto a força associada a tensão superficial cresce com o diâmetro da gota, restando a mesma na ponta do eletrodo. Caso não houvessem forças que atuassem em sentido contrário, como a força gravitacional, a gota cresceria infinitamente. No entanto, como F_y cresce em proporção direta com o diâmetro, enquanto a F_g cresce em proporção do diâmetro ao cubo, em um certo momento a gota vai atingir um determinado valor denominado diâmetro crítico, em que a força gravitacional irá superar a força devido a tensão superficial, e ocorrerá o destacamento da gota (Scotti e Ponomarev, 2014). Em alguns casos F_y pode favorecer a transferência metálica. Esse favorecimento ocorre quando a gota toca a poça de fusão, o que resulta em uma menor área de superfície livre por volume, e conseqüentemente um menor valor de F_y . (Scotti e Ponomarev, 2014).

2.4.2.3. Força Eletromagnética (F_m)

A força eletromagnética, também denominada força de Lorentz, é a resultante obtida a partir de um conjunto de forças radiais induzidas pelo campo eletromagnético atuante na gota. Esse tipo de força é desprezível em um sólido, mas em um condutor líquido, como uma gota, F_m desloca o material fundido da superfície em direção ao centro da gota, na forma de compressão. Como resultado a gota tende a se alongar em uma direção oposta à do eletrodo, assumindo um formato cilíndrico (Scotti e Ponomarev, 2014). A força eletromagnética pode ser expressa como:

$$F_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 R^2} \left(\frac{1 - r^2}{R^2} \right)$$

Onde:

μ permeabilidade magnética do material;

I é a intensidade de corrente;

R é o raio da gota;

r é a posição no plano em que está se medindo a gota

2.4.2.4. Força de Arraste (F_a)

A força de arraste é resultado do arraste exercido pelos gases de proteção sobre a gota de metal, e se origina no contato entre a gota e o jato de plasma (Modenesi, 2012).

Pequenas depressões são geradas na parte inferior da gota, o que faz com que ela seja arrastada pelo fluxo de gases. Assim como F_g , F_a continua a agir sobre a gota mesmo após seu destacamento, sendo cada vez mais forte a medida que a distância em relação a chapa diminui (Scotti e Ponomarev, 2014). A força de arraste pode ser expressa como:

$$F_a = \frac{1}{2} \pi v^2 \rho_g r^2 C_a$$

Onde:

r é o raio da gota;

v é a velocidade do gás;

ρ_g é a densidade do gás;

C_a é o coeficiente de arraste;

2.4.2.5. Força de vaporização

A força de vaporização surge a partir da vaporização de componentes do arame na região do acoplamento do arco com a gota. Ocorre devido altos valores de corrente e de pressão de vapor, gerando jatos de vapores metálicos que exercem uma força contrária ao destacamento da gota, mantendo-a retida por mais tempo (Modenesi, 2012). A força de vaporização pode ser expressa como:

$$F_v = \frac{m_0}{\rho_v} IJ$$

Onde:

m_0 é a massa vaporizada;

ρ_v é a densidade do vapor;

I é a intensidade de corrente;

J é a densidade de corrente;

2.4.3. Teoria da instabilidade Pinch

Nos casos em que os valores de corrente de soldagem estão acima do valor da corrente de transição, a fluidez do metal da gota se torna maior e explicar a transferência metálica pela ação das forças estáticas torna-se mais complicado.

Nesse cenário a transferência metálica pode ser explicada através da teoria de instabilidade Pinch (Liskevych, 2010).

Acima da corrente de transição, o calor gerado provoca a fusão excessiva do eletrodo, que assume a forma cilíndrica ao invés da forma progressiva de gotas. A repartição dessa coluna cilíndrica na forma de gotas sequências decorre da instabilidade da coluna de líquido. Qualquer perturbação nela provoca ativação de forças que atuam repartindo a coluna líquida e formando gotas, que possuem energia livre menor que a da coluna líquida. O comportamento deste fenômeno é definido por dois fatores, a tensão superficial, que tende a reconstruir a coluna, e o efeito Pinch que, ao surgir uma perturbação, atua ampliando seus efeitos sobre a coluna de líquido. A coluna de líquido só se romperá na forma de gotas sequenciais quando o efeito Pinch superar o efeito da tensão superficial (Frota, 2007; Liskevych, 2010; Scotti e Ponomarev, 2014).

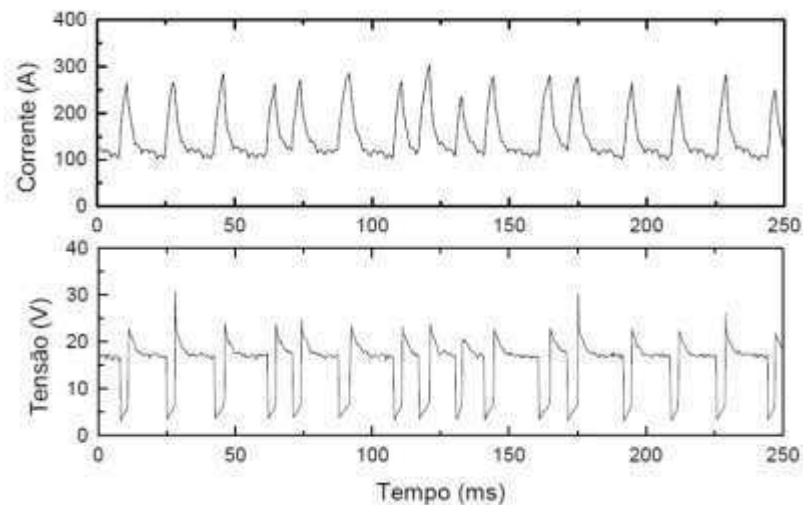
2.4.4. Transferência metálica por curto-circuito

Na transferência por curto-circuito, o metal fundido, na forma de gota, é transferido para o metal base somente quando ocorre o contato da gota com a poça de fusão, ocorrendo o curto circuito e a extinção do arco, não havendo transferência pelo arco elétrico. Devido ao fato deste tipo de transferência ocorrer para baixos valores de corrente e tensão, assim como a ocorrência de curtos-circuitos frequentes, a quantidade de calor transferida para a peça é reduzida e a poça de fusão gerada possui menores dimensões. Estas características tornam este tipo de transferência ideal para a soldagem de peças com pequenas espessuras e possibilita a soldagem em praticamente todas as posições (Barbedo, 2011; Pessoa, 2007).

Os baixos valores de corrente e tensão utilizados neste tipo de transferência também são responsáveis por permitir gotas de grande raio crítico e arcos de tamanho reduzido, que implicam no contato da gota com a poça antes de seu destacamento (Scotti & Ponomarev, 2014).

Durante a soldagem com a transferência por curto-circuito, ocorrem de 20 a 200 curtos por segundo, o que varia de acordo com as condições de soldagem. O período de curto-circuito (intervalo de tempo entre o início de dois eventos

distintos de curto circuito) varia com o valor da tensão de soldagem (Filho, 2014). A figura 18 mostra um oscilograma típico da transferência por curto circuito.



**Figura 18 – Oscilograma típico de uma transferência por curto-circuito para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O₂.
Fonte: Modenesi (2012)**

Durante o curto circuito, a ponta do eletrodo é fundida devido ao aquecimento por efeito Joule, resultando na formação da gota. Com um certo tamanho, a gota é separada do eletrodo sob a ação combinada de diferentes forças, incluindo a gravidade, a força eletromagnética e a tensão superficial. O equilíbrio entre estas forças pode ser perturbado pelo transporte do metal líquido para a poça de fusão ou por falha da proteção gasosa (Rao et al., 2010).

No início da transferência do metal, a força de tensão superficial resiste ao desprendimento da gota, entretanto quando a gota toca a poção de fusão, a força muda sua direção favorecendo o destacamento da gota. A força eletromagnética é resultado do fluxo e rotação do meio, e sua influencia sobre o material fundido na ponta da gota é conhecida como efeito Pinch que atua sobre o destacamento da gota (Luksa, 2006).

Conforme o eletrodo continua a ser fundido, e o volume da gota se aproxima do diâmetro crítico, ocorre uma redução da sessão transversal na região do acoplamento da gota com o eletrodo, com a conseqüente formação de um empescoamento. A redução da seção transversal e o crescimento da densidade de corrente geram uma grande pressão na região do empescoamento, a força eletromagnética passa então a favorecer o destacamento da gota, que é

impulsionada em direção a poça de fusão, este efeito é denominado efeito Pinch (Scotti e Ponomarev, 2014)

Após o destacamento, a gota é então transferida para a peça de trabalho por ação da força de gravidade e do arrasto exercido pelo fluxo de plasma de alta velocidade. A gota, que transporta a energia térmica, entra em contato com a peça que, juntamente com o plasma aquecido e o aquecimento Joule, aquece e funde a peça de trabalho. Ao mesmo tempo, a massa da gota se mistura com a peça de trabalho para formar o cordão de solda. Este processo se repete até que a corrente de soldagem seja desligada, o material fundido se solidifica e um cordão de solda é formado (Hu & Tsai, 2007).

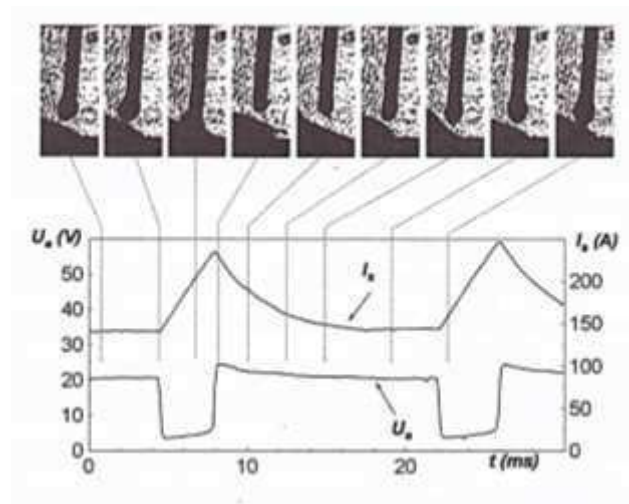


Figura 19 – Variação de corrente e tensão durante a transferência por curto-circuito
Fonte: Modenesi (2012)

A figura 19 mostra as variações de corrente (I) e tensão (U) durante um período de curto circuito. Em um primeiro momento, o arco encontra-se aberto e a corrente apresenta um baixo valor enquanto ocorre a formação da gota. Após a gota tocar a poça de fusão, ocorre o curto-circuito, com a consequente extinção do arco, e uma brusca queda da tensão. Durante o período de curto-circuito a corrente se eleva, enquanto ocorre o destacamento da gota e a tensão se mantém baixa. Com o destacamento da gota a tensão se normaliza e a corrente passa a diminuir.

A corrente de soldagem é uma variável importante na transferência por curto-circuito, e sofre influência da indutância. Um baixo valor de indutância resulta em um elevado gradiente de subida de corrente durante o curto circuito, o

que ocasiona um rompimento de forma violenta quando a gota entra em contato com a poça de fusão, com a repulsão da gota pela superfície da poça, o que pode gerar a vaporização do metal e uma quantidade excessiva de respingos. Por outro lado, um alto valor de indutância gera um gradiente de subida de corrente menor, o que diminui a probabilidade da ocorrência de repulsão. No entanto, um gradiente muito baixo leva a um tempo de destacamento muito alto, o que pode provocar o mergulho do eletrodo na poça de fusão, interrompendo o processo devido ao arame superaquecido formando um emaranhado não fundido sobre o metal base. Visto isso, o gradiente de subida de corrente precisa ser alto o bastante para garantir a transferência da gota, mas também baixo o suficiente para minimizar a geração de respingos (Modenesi, 2012; Scotti & Ponomarev, 2014). A figura 20 mostra o efeito da regulação da indutância sobre o gradiente de subida da corrente.

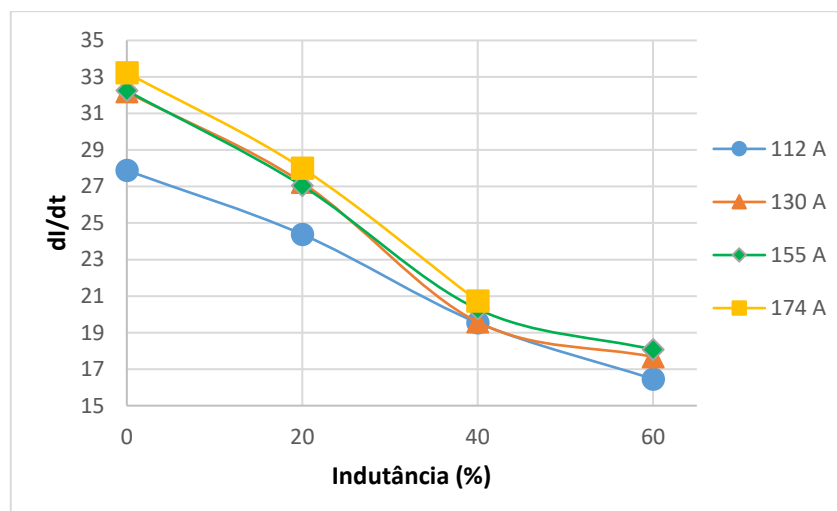


Figura 20 - Efeito da regulação de indutância nas taxas de variação da corrente em função da corrente de soldagem, utilizando arame tubular E70C-6M e gás de proteção Ar+25%CO₂
 Fonte: Kobayashi et al. (2005)

A tensão de soldagem tem forte influência sobre a geração de respingos na transferência por curto-circuito, e seu ajuste é proporcional ao comprimento do arco. Quando arcos muito curtos estão operando, os tempos de arco tornam-se muito curtos (tempo em que ocorre a fusão do eletrodo). Quando a ponta do arame entra em contato com a poça de fusão, a gota pode não ter volume suficiente para que a transferência ocorra de maneira apropriada. Neste caso, há curto-circuitos, mas não necessariamente transferência de metal (tempos de curto-circuito reduzidos). Como resultado, a transferência de metal é irregular e

uma elevada quantidade de respingos é gerada. Por outro lado, se o arco é muito longo, a gota cresce demasiadamente antes de tocar a poça, tendendo a promover oscilações caóticas. Como resultado ocorrem ligeiros contatos entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão, mas sem transferência metálica e com possibilidade de geração de respingos, um fenômeno denominado curto-circuito incidental (Meneses et al., 2014; Scotti et al., 2012; Souza et al., 2011).

A figura 21 mostra o comportamento da tensão e da corrente durante a transferência por curto circuito com a ocorrência de curtos-circuitos incidentais. É possível notar que os curtos-circuitos incidentais apresentam períodos de curto-circuito relativamente baixos se comparados aos períodos de curto-circuito onde ocorre a transferência metálica.

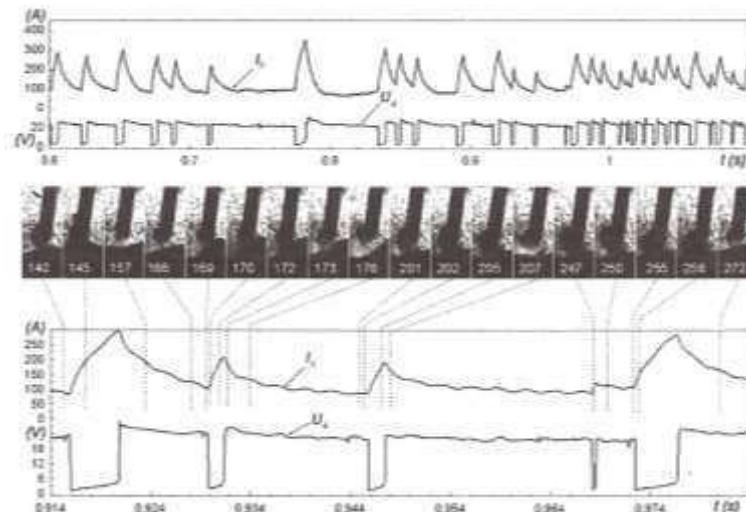


Figura 21 – Oscilogramas de tensão e corrente mostrando a ocorrência de curtos-circuitos incidentais
Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

2.4.5. Transferência Global

A transferência metálica global se caracteriza pela utilização de valores de tensão de intermediários a altos e baixos valores de corrente. As gotas que se formam possuem um diâmetro que varia de acordo com a corrente, normalmente apresentando menor diâmetro para maiores valores de corrente, mas no geral apresentando diâmetro médio maior que o diâmetro do eletrodo (ASTM, 1993).

As gotas se transferem para a poça com uma baixa frequência (1 a 10 gotas por segundo), gerando um elevado nível de respingos (Marques et al., 2011). A transferência das gotas para a poça de fusão se dá pela ação da gravidade, o que limita a aplicação da transferência globular à posição plana. A gota se mantém na ponta do eletrodo por ação de uma tensão superficial até atingir um determinado peso que neutraliza essa tensão, ocorrendo a transferência para a poça de fusão (Modenesi, 2012). A figura 22 mostra o oscilograma com o comportamento típico de tensão e corrente em função do tempo para a transferência globular na soldagem com eletrodo de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro com gás de proteção Ar+5%CO₂.

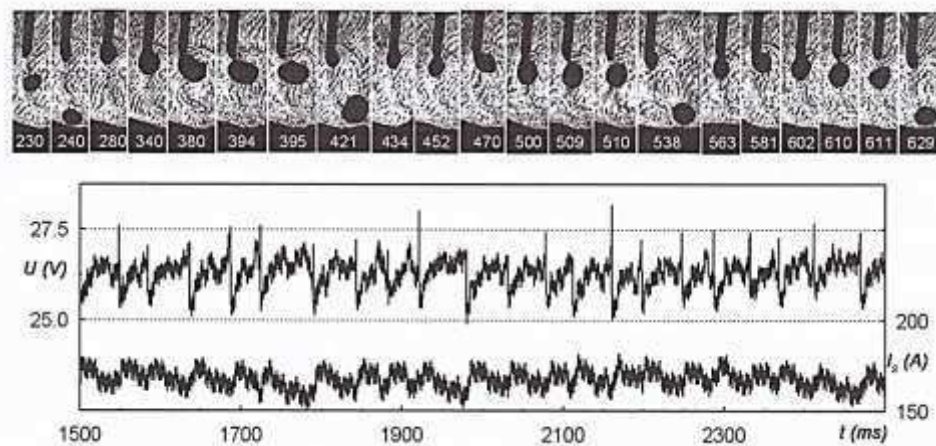


Figura 22 – Transferência metálica globular na soldagem de aço carbono e proteção com Ar + 5%O₂
Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

2.4.6. Transferência Goticular

A transferência metálica goticular, também conhecida como spray, consiste na transferência de pequenas gotas, geralmente com diâmetro médio inferior ao do eletrodo, de forma sequencial e em alta frequência para a poça de fusão. Ocorre com polaridade positiva, em altos valores de corrente e tensão, apresentando elevada estabilidade do arco e baixo nível de respingos (Fonseca, 2015).

Uma condição necessária para que este modo de transferência ocorra é que a corrente de soldagem atinja um valor crítico, denominado corrente de

transição, a partir da qual a transferência metálica deixa de ser globular e passa a ser por spray (Nogueira, 2015). Com isso ocorre uma elevada redução no tamanho das gotas, um aumento da frequência de transferência das mesmas, enquanto o arco que antes cobria apenas a parte inferior da gota, passa a envolvê-la por completo (Modenesi, 2012).

Na transferência por spray, devido à elevação da corrente de soldagem, as gotas formadas passam a sofrer à ação de forças eletromagnéticas, que se sobrepõe à ação da gravidade, e que em teoria permitiria a soldagem em todas as posições. Porém, como este tipo de transferência só ocorre em altos valores de corrente, sua utilização fica restrita à chapas de maior espessura e à posição plana, devido ao elevado tamanho da poça de fusão (Marques et al. , 2011).

A figura 23 mostra os oscilogramas típicos da transferência por spray. Pode se observar que, para este tipo de transferência, tanto a tensão quanto a corrente não exibem variações significativas, o que evidencia a estabilidade do processo.

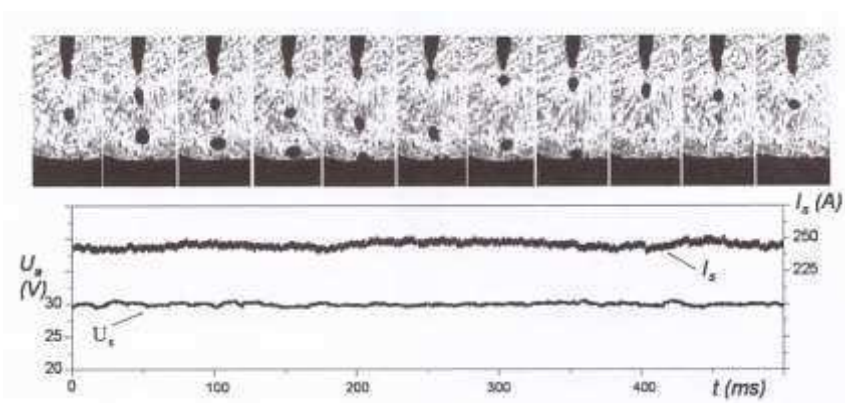


Figura 23 - Transferência metálica globular na soldagem de aço carbono e proteção com Ar + 5%O₂
Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

A corrente de transição varia de acordo com diversos fatores, sendo os principais o a composição, o diâmetro, o comprimento energizado do eletrodo e o tipo de gás de proteção utilizado. Geralmente, a determinação da corrente de transição é realizada experimentalmente através de ensaios com aumento global da intensidade da corrente de soldagem (Scotti e Ponomarev, 2014).

2.5. Estabilidade da soldagem a arco elétrico

A estabilidade de um processo de soldagem a arco elétrico é um tema bastante complexo e muito estudado. Depende das condições do arco e do tipo de transferência do metal, além de vários outros fatores como as condições de alimentação do arame e as características da fonte de energia (Resende, 2007).

A definição de estabilidade é uma tarefa de grande complexidade, devido aos inúmeros métodos de análise da mesma e aos diferentes conceitos utilizados pelos pesquisadores. Segundo Scotti e Ponomarev (2014) a estabilidade do processo GMAW consiste na capacidade de manter um processo repetitivo com boa aparência operacional, o que resultaria em poucos ruídos e respingos e em cordões de solda de boa aparência.

A estabilidade do processo GMAW é avaliada com base em três fatores: estabilidade do arco, regularidade da transferência metálica e comportamento operacional do processo de soldagem, os quais se relacionam de forma muito próxima e complexa (Rezende et al., 2011).

Devido a importância da transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW, esta tem sido alvo de inúmeros estudos com o intuito de ampliar o conhecimento e aperfeiçoar este tipo de transferência metálica.

O principal problema da transferência por curto-circuito é a geração de respingos, que diminui a capacidade de produção, devido à perda de material de adição e à necessidade de gasto de recursos para sua retirada. Muitos destes estudos, voltados para a redução da geração de respingos, baseiam-se na melhoria da estabilidade de curtos- circuitos através da correta regulação dos parâmetros de soldagem (Souza et al., 2011).

Hermans e Ouden (1999), em seus trabalhos, apontam que a instabilidade da transferência por curto-circuito ocorre devido a três fatores: Curtos-circuitos instantâneos, onde eletrodo toca a poça de soldagem por um curto período de tempo, mas não há transferência de metal; falha de reignição do arco e variação na velocidade de alimentação de arame.

Segundo Dutra et al. (1995), a estabilidade da transferência por curto circuito pode ser definida como a regularidade na formação e separação das gotas metálicas, podendo ser avaliada com base na repetição temporal dos valores instantâneos de tensão e corrente. Ainda segundo os autores, a análise

dos valores de tensão e corrente, na forma de oscilogramas, oferece indicativos para mensurar a regularidade da transferência, que servem como base para uma comparação, quantitativa, entre soldagens com diferentes parâmetros e variáveis de processo.

Com relação às transferências globular e spray, a estabilidade pode ser avaliada, por exemplo, pelo nível de respingos e pelo desvio padrão dos picos de corrente e tensão. Para o caso da transferência por spray, o arco elétrico possui uma elevada estabilidade, com baixa quantidade de respingos e desvio padrão de picos de corrente e tensão muito baixos. Já a transferência globular é mais instável se comparada a spray, com níveis de respingos e desvios padrão maiores devido ao tamanho elevado das gotas (Resende, 2007). A figura 24 mostra um comparativo entre os modos de transferência globular, spray e spray com alongamento.

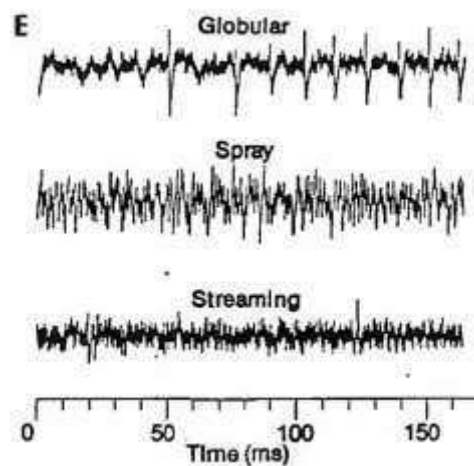


Figura 24 - Oscilogramas de transferências globular, spray e spray com alongamento ou streaming. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O₂
Fonte: Johnson et al. (1991)

A velocidade de alimentação do arame também pode ser utilizada para avaliar a estabilidade do processo GMAW, uma vez que a passagem do arame pode causar o desgaste do tubo de contato, no entanto esse tipo de problema ocorre mais em soldagens que utilizam correntes elevadas (Quinn et al., 1994).

2.5.1. Indicadores de estabilidade

Para poder avaliar o desempenho do processo GMAW, muitos autores propuseram índices que mensurassem a estabilidade do mesmo quando operando em curto-circuito.

Para analisar a estabilidade da transferência metálica por curto circuito, Baixo e Dutra (1995) utilizaram um programa para aquisição e tratamento dos sinais de corrente e tensão na forma de oscilogramas, avaliando a estabilidade com base na regularidade apresentada pelos oscilogramas. A estabilidade é representada através de histogramas de três diferentes grandezas: picos de corrente, do período de transferência e de tempo de curto-circuito. A regularidade da transferência metálica é então mensurada com base no cálculo dos desvios padrões destas grandezas. Baixo e Dutra mostraram que, em uma certa faixa de tensão, existe um ponto de inflexão onde o desvio padrão de pico de corrente é mínimo, indicando um ponto de máxima estabilidade. A análise geométrica e microestrutural mostrou que os cordões de solda obtidos nesta faixa de tensão apresentaram os melhores resultados, o que comprovava a condição de máxima estabilidade.

Modenesi e Avelar (1997) em seu trabalho utilizaram como indicativos de estabilidade a variação do período de transferência (T), o tempo médio de duração de um curto-circuito (t_{cc}), e um fator de respingos (R), que os autores determinaram com base na razão entre o peso dos respingos e o peso do metal de adição (metal depositado + respingos). A partir destes dados, os autores definiram o índice de estabilidade (IE), cuja expressão agrupa o período de transferência (T) e o fator de respingos (R):

$$IE = \frac{100}{(TxR)}$$

Onde:

T é o período de transferência;

R é um fator de respingos, definido como a razão entre o peso dos respingos coletados e o peso do metal de adição (metal depositado + respingos);

Marques, et al. (1998), em um estudo sobre a estabilidade da transferência por curto circuito, utilizaram histogramas de períodos de transferência para diferentes valores de tensão. Os autores relacionam o tipo de distribuição do histograma com a estabilidade do processo, medida pela quantidade de respingos gerada, e concluíram que a operação e a distribuição de períodos de transferência tendem a ser multimodal.

Suban e Tušek (2003), em seu trabalho utilizaram como indicadores de estabilidade os valores de corrente e tensão, avaliando a regularidade da distribuição destes valores em histogramas, para diferentes parâmetros de soldagem. Adicionalmente estabeleceram um índice baseado em diagramas de tensão versus deformação, com gráficos com aspecto semelhante a um laço. Através da análise dos gráficos, os autores relacionaram a variação dos formatos dos laços com a regularidade dos histogramas de tensão e corrente. Os processos que apresentaram maior uniformidade no formato dos laços foram aqueles considerados os mais estáveis de acordo com a análise dos histogramas.

Roca et al. (2007) desenvolveram um método para a análise da estabilidade da transferência por curto-circuito baseado na determinação das áreas dos diagramas de tensão versus corrente, que apresentam uma forma semelhante à um laço. Para isso foi desenvolvido um algoritmo para realizar o cálculo das áreas dos laços obtidos nas curvas de tensão versus corrente. O estudo se baseou na avaliação da dispersão das áreas dos laços para os conjuntos de variáveis utilizados em comparação com os critérios clássicos de estabilidade da transferência metálica, como desvio padrão de picos de corrente e tempo de curto-circuito. Os resultados mostraram que as soldagens com os maiores desvios padrões de áreas dos laços foram aquelas que, segundo os critérios clássicos de estabilidade, foram as mais instáveis, mostrando a viabilidade do método para a avaliação da estabilidade da transferência metálica.

Kang e Rhee (2003) estabeleceram um índice baseado na quantidade de respingos gerados durante a soldagem relacionada com os sinais elétricos adquiridos. Os autores então realizaram uma série de regressões lineares e não-lineares que relacionavam a quantidade de respingos gerados com os diversos aspectos das soldagens, como fatores de entrada o período de curto-circuito, os tempos de arco aberto, curto-circuito, pico de corrente de curto, corrente

instantânea de curto-circuito, corrente média pelo período de curto-circuito e os respectivos desvios padrões destes parâmetros. Os modelos que se mostraram mais efetivos para estimar a quantidade de respingos foram os que relacionavam a quantidade de respingos com o número de extinções do arco durante a soldagem. Os resultados mostraram que a quantidade de respingos gerados é proporcional ao número de extinções do arco durante a soldagem, sendo que os arcos mais estáveis foram obtidos quando houve um menor número de extinções do arco.

Hermans e Ouden (1999) registraram em seu trabalho que as oscilações da poça de fusão, causadas pela reignição do arco e ruptura da ponte metálica, são responsáveis por diminuir a estabilidade do arco. Os autores então propuseram um critério de estabilidade baseado na frequência de curto-circuito e na avaliação das oscilações da poça de fusão. Para isso foram realizadas uma série de soldagens, onde a tensão foi mantida constante enquanto a velocidade de alimentação de arame sofria um incremento, para que fossem produzidas poças de fusão de diferentes dimensões. Durante o processo, a frequência de curto-circuito era medida e as oscilações na poça de solda foram calculadas. Os autores concluíram que a condição de máxima estabilidade do processo ocorre quando a frequência de curto-circuito está sincronizada com as oscilações da poça de solda.

Em seu trabalho Mita, Sakabe, e Yokoo (1988) estudaram a estabilidade do arco elétrico, em soldagens utilizando CO₂ como proteção gasosa, por meio da análise dos oscilogramas de corrente e tensão. Utilizando múltiplas regressões, os autores determinaram um índice de estabilidade baseado nos desvios padrão de fatores retirados dos oscilogramas (tempo de curto-circuito, tempo de arco aberto, picos de corrente e corrente média). Os resultados demonstraram que os fatores utilizados mostraram uma forte correlação com a estabilidade do arco elétrico, e que a estabilidade do arco é máxima para menores valores do índice proposto.

Scotti e Ponomarev (2014) utilizam como índices básicos para a avaliação da estabilidade do arco o tempo de arco aberto (t_{ab}), que representa o tempo de crescimento da gota na ponta do eletrodo, e o tempo de curto-circuito (t_{cc}), que é a duração da transferência da gota para a poça de fusão. Outros índices auxiliares surgiram derivados de t_{ab} e t_{cc} , são eles:

- Período de curto-circuito

$$P_{cc} = t_{ab} + t_{cc}$$

- Frequência de curto-circuito

$$F_{cc} = \frac{1}{P_{cc}}$$

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

$$K_{cc} = \frac{t_{cc}}{P_{cc}}$$

A maioria dos autores utiliza a regularidade dos elementos dos oscilogramas ou a relação entre sentimentos do soldador e alguns modelos para estimar o comportamento operacional do processo de soldagem GMAW, mas nenhum deles considera estabilidade do arco e regularidade da transferência metálica de maneira conjunta (Rezende et al., 2011).

Baseado nesse comportamento, o Grupo Laprosolda criou um critério que visa quantificar a estabilidade de transferência por curto-circuito no processo de soldagem GMAW, considerando que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e com arco aberto, e que cada gota ao se destacar tenha um volume adequado para que a tensão superficial possa agir sobre as mesmas realizando a transferência. Assim, esse critério tem de satisfazer dois parâmetros, a saber:

- 1) Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito (IV_{cc}): Este índice é determinado por intermédio dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito (t_{cc}) e de arco aberto (t_{ab}), e visa quantificar a regularidade da transferência metálica, com base nos valores constantes dos tempos de curto circuito e de arco aberto (Rezende et al., 2011; Scotti & Ponomarev, 2014; Souza et al., 2011), como mostra a equação:

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{tab}}{t_{ab}}$$

Onde

σ_{tcc} é o desvio padrão da média do tempo de curto-circuito;

σ_{tab} é o desvio padrão da média do tempo de arco aberto

t_{cc} é a média do tempo de curto-circuito

t_{ab} é a média do tempo de arco aberto

- 2) Faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito (F_{cc}): define os volumes da gota transferida a cada curto-circuito, de forma a permitir uma transferência adequada para a poça de fusão por efeito da tensão superficial. A gota não chega a atingir grandes diâmetros, mas apresenta um volume mínimo em função do diâmetro, densidade e velocidade de alimentação do eletrodo e dos gases de proteção. Porém, medir o tamanho médio de gota é uma tarefa complicada e requer equipamentos especiais (Rezende et al., 2011; Scotti e Ponomarev, 2014; Souza et al., 2011). Mas pode-se estimar esta faixa de volume pelo cálculo das frequências máximas (F_{ccmax}) e mínimas (F_{ccmin}) esperadas:

$$F_{cc} = \frac{V_{alim}(d)^2}{(\phi_g)^3}$$

Onde:

F_{cc} é a frequência de curtos-circuitos para o valor máximo e mínimo de ϕ_g ;

V_{alim} é a velocidade de alimentação de arame;

d é o diâmetro do arame;

ϕ_g valores máximos e mínimos de diâmetro adequado da gota;

2.5.2. Aquisição dos sinais elétricos

A aquisição dos sinais elétricos gerados durante a soldagem é realizada através da utilização de equipamentos específicos. Entre os vários sistemas disponíveis no mercado destaca-se o SAP v4, desenvolvido pela empresa IMC Soldagem, que é composto de sensores capazes de medir sinais de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás de soldagem e de um software para

registro destes sinais (IMC Soldagem, 2014). A figura 25 mostra o painel de conexões do sistema SAP v4.



Figura 25 – Painel de conexões do sistema SAP v4

De acordo com a fabricante do sistema, as principais funcionalidades do SAP v4 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.
- Identificar, através dos gráficos de tensão e corrente em relação ao tempo, o modo de transferência metálica.

As figuras 26 e 27 mostram dois oscilogramas, um de tensão e outro de corrente, gerados pelo sistema SAP v4. No oscilograma de corrente é possível ver os picos de corrente (I_p), e as derivadas de subida (D_s) e de descida (D_d). No

oscilograma de tensão vemos os picos de tensão (U_p), períodos de transferência (T), períodos de arco aberto (T_a) e períodos de curto-circuito (T_c).

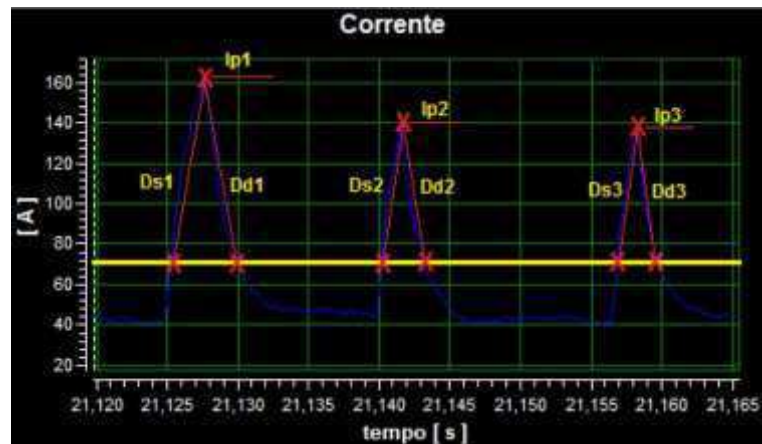


Figura 26 – Oscilogramas de corrente produzido pelo SAP v4
Fonte: IMC Soldagem (2014)

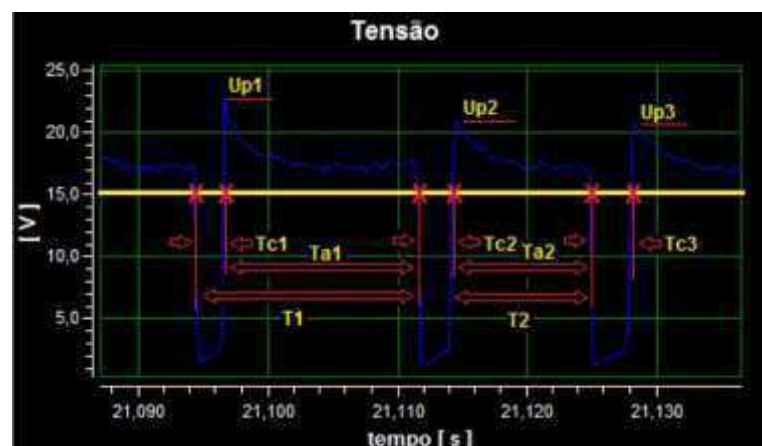


Figura 27 - Oscilogramas de corrente produzido pelo SAP v4
Fonte: IMC Soldagem (2014)

O sistema SAP v4, a partir dos sinais coletados, gera oscilogramas, ciclogramas e histogramas, e pode também calcular valores numéricos que servem como indicativo da estabilidade do processo de soldagem. São eles:

- Média aritmética (\bar{X}): é a soma dos valores medidos de uma variável (x_i) dividida pelo número de medidas (n).

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- Desvio padrão (σ): é a raiz quadrada dos desvios médios quadráticos da variável em estudo em relação ao valor médio, conforme a equação:

$$\sigma = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 / (n - 1) \right]}$$

- Coeficiente de variação (K_v): também conhecido como desvio relativo, é a razão entre o desvio padrão e a média, conforme a equação:

$$K_v = \left(\frac{\sigma}{\bar{X}} \right) \cdot 100\%$$

A figura 28 mostra uma das telas do sistema SAP v4, que apresenta informações gerais sobre a soldagem e os índices estatísticos calculados.

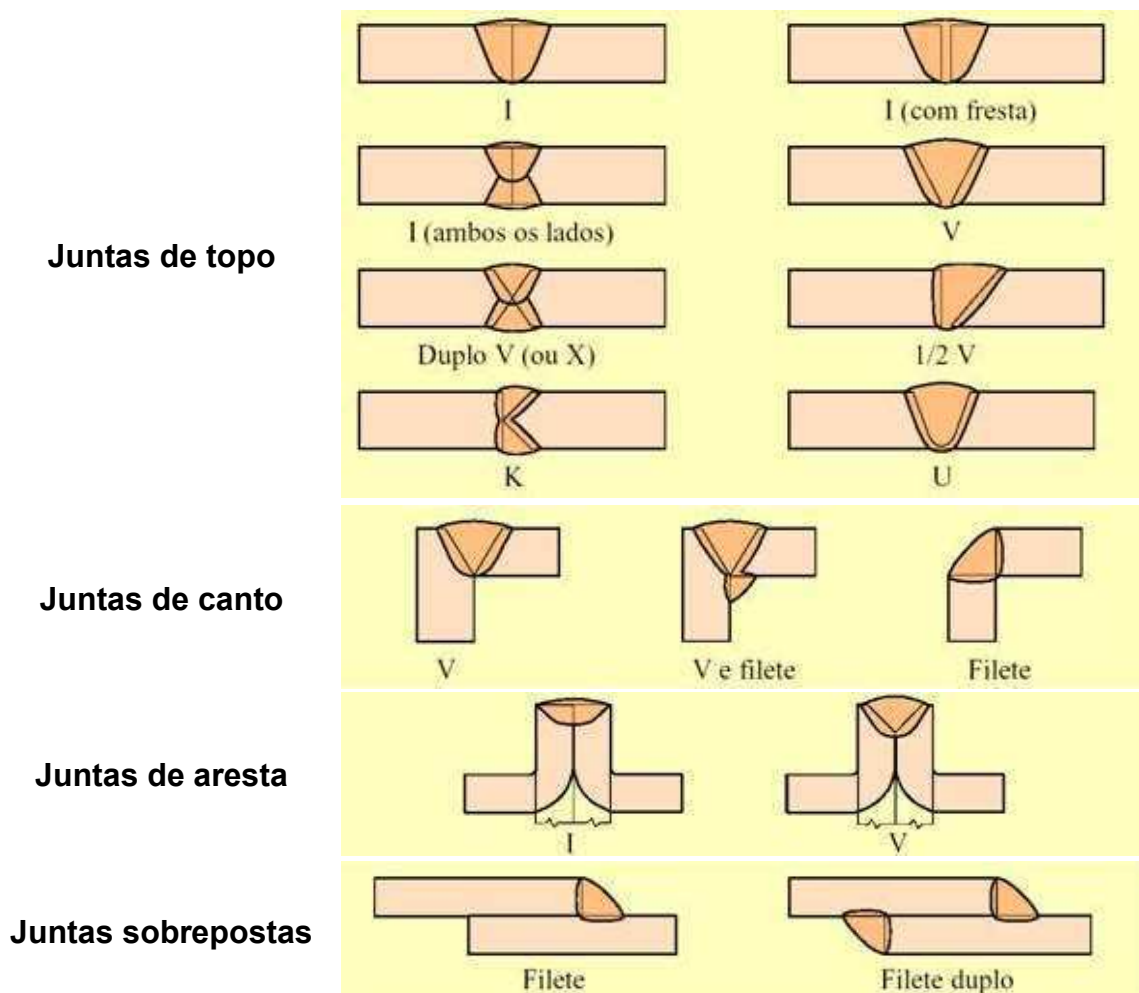
Informação Gerais		Informação Específicas					
Informações Ensaio		Picos de Corrente		Picos de Tensão			
Processo	Fonte 1	Total Picos	161,0	Total Picos	161,0		
Vel. do Arame	5,0	Média (A)	129,0	Média (V)	20,3		
Mat. do Arame	E7096	D. P. (A)	4,7	D. P. (V)	2,1		
Diã. do Arame	1,2	D. R. (%)	3,7	D. R. (%)	10,3		
Tipo de Gás	C25						
Vazão do Gás	12						
Medidas		Período		Período de Arco		Período de Curto Circuito	
Im(A)	64,6	Total Trans.	160,0	Total Trans.	159,0	Total Trans.	161,0
Ue(V)	15,6	Média (ms)	12,4	Média (ms)	11,0	Média (ms)	1,5
Ie(A)	67,8	D. P. (ms)	3,3	D. P. (ms)	3,2	D. P. (ms)	0,2
Ue(V)	16,4	D. R. (%)	26,6	D. R. (%)	29,0	D. R. (%)	11,3
Pf(kW)	1,0						
Re(s)	1,75	Derivada Subida		Derivada Descida			
rc(s)	0,23	Total Deriv.	161,0	Total Deriv.	161,0		
Ti(s)	1,39	Média (A/ms)	55,2	Média (A/ms)	27,8		
Vm(mm3)	1,17	D. P. (A/ms)	3,2	D. P. (A/ms)	3,6		
Om(mm)	1,31	D. R. (%)	9,9	D. R. (%)	12,8		
ds/dt (A/ms)	95,2						
dd/dt (A/ms)	27,8						

Figura 28 – Informações gerais e específicas obtidas pelo SAP v4

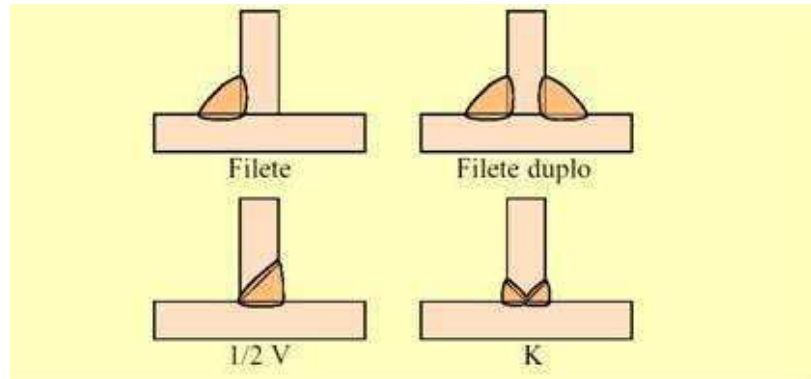
2.6. Juntas

Junta é o termo que se refere a região onde duas ou mais peças serão unidas através do processo de soldagem. A posição em que as peças serão soldadas, as dimensões das peças e as necessidades do projeto determinam o tipo de junta a ser utilizada, o que implica em uma preparação especial das peças na forma de corte ou de uma conformação especial, para que então possa ser realizada a soldagem (Marques et al., 2011). A tabela 5 mostra os tipos mais comuns de juntas aplicadas a soldagem.

Tabela 5 – Tipos de juntas aplicadas a soldagem



Juntas de angulo



Para executar as soldas, na maioria das vezes se faz necessário preparar aberturas ou sulcos na superfície das peças que serão unidas, estas aberturas recebem o nome de chanfro. O chanfro é projetado em função da espessura da peça, do material, do processo de soldagem a ser adotado, das dimensões da peça e da facilidade de acesso à região de solda; abaixo vemos alguns dos tipos de chanfros mais comuns em matéria de soldagem. A figura 29 mostra algumas das características dimensionais dos chanfros e das juntas de topo e angulo (Marques et al., 2011).

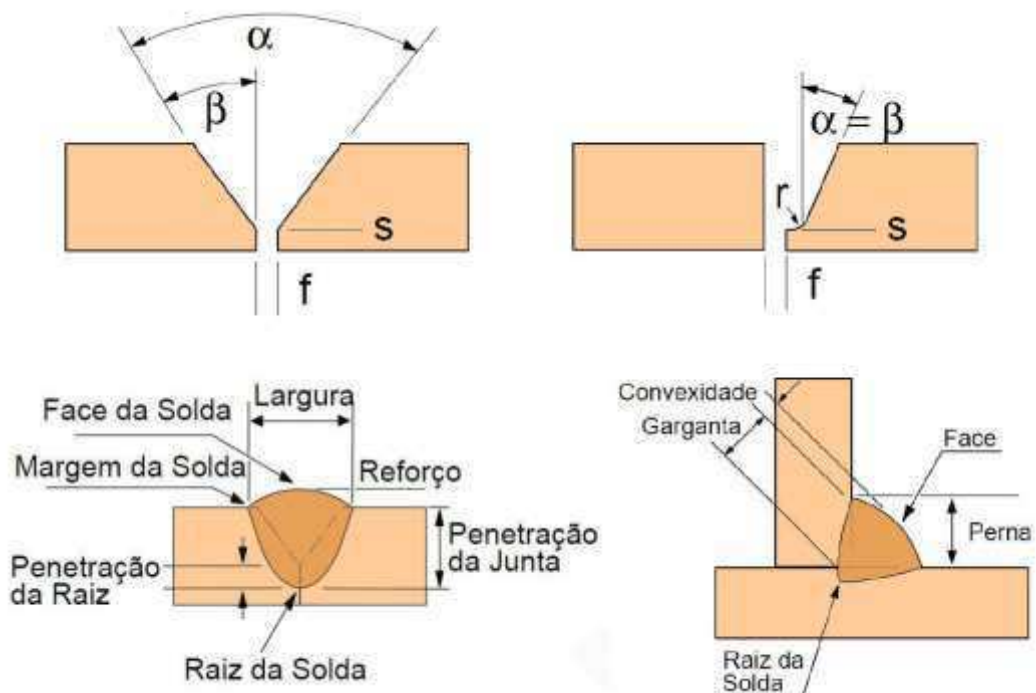


Figura 29 - Características dimensionais dos chanfros e das soldas de topo e filete.
 S = Nariz, f = Abertura de raiz ou Fresta, r = Raio do Chanfro, α = Ângulo do Chanfro, β = Ângulo do Bisel

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e os métodos utilizados para a avaliação dos efeitos da adição de gás propileno em proteções gasosas convencionais na soldagem a arco elétrico pelo processo GMAW com transferência por curto-circuito aplicada à juntas de topo e ângulo.

3.1. Materiais

Os seguintes materiais foram utilizados:

- a) Chapas de aço carbono SAE 1020 nas dimensões de 200x50x6,35 mm para as juntas em ângulo e 200x50x12,7 mm para as juntas de topo.
- b) Bobina com arame de solda de $\varnothing 1,2$ mm, classificação ER70S-6

Tabela 6 – Composição química do aço SAE1020 e do arame ER70S-6
Fonte: Adaptado de Fortes (2005)

Classificação		Composição Química				
		C	Mn	Si	S	P
SAE	1020	0,18 - 0,23	0,15 - 0,35	0,30 - 0,60	0,05 máx.	0,03 máx.
AWS	ER70S-6	0,07 - 0,15	1,40 - 1,80	0,80 - 1,15	0,035 máx.	0,025 máx.

- c) Discos de corte e desbaste.
- d) Lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh.
- e) Pasta abrasiva de alumina de 1 e 0,5 μm
- f) Solução de Nital (ácido nítrico + álcool etílico) 2% e 5%
- g) Verniz incolor
- h) Líquido penetrante lavável em água VP30 e revelador metal D-70.
- i) Cilindros de Gases fornecidos pela empresa White Martins contendo os seguintes gases:

Tabela 7 – Composição dos gases de proteção			
Nomenclatura	Composição (%)		
	Ar	CO ₂	C ₃ H ₆
Ar+25%CO ₂	75	25	-
Ar+25%CO ₂ +C ₃ H ₆	74,4	25	0,6
CO ₂	-	100	-
CO ₂ +C ₃ H ₆	-	98,7	1,3

3.2. Equipamentos

Para a realização da soldagem e análise dos experimentos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Conjunto semiautomático para soldagem GMAW da marca ESAB modelo Smashweld 316 com CEF tensão constante e alimentador de arame embutido.
- b) Trator de soldagem modelo A2T Multitrac da fabricante ESAB.
- c) Sistema de aquisição de dados SAP V4 da empresa IMC Soldagem, conforme mostra a figura 24.
- d) coletor em forma de caixa.
- e) Picadeira com mola para remoção da escória.
- f) Escova de aço para limpeza do cordão de solda.
- g) Balança com resolução de 0,1 g.
- h) Balança com resolução de 0,001g.
- i) Máquina de corte Mesotom da marca Struers-Panambra com refrigeração a água contendo óleo solúvel.
- j) Equipamento de embutimento automático.
- k) Lixadeira semiautomática Struers-Panambra DP-10.
- l) Máquina de polimento semiautomática da marca Arotec.
- m) Microscópio ótico Olympus com aumento que varia de 50x a 1000x.
- n) Microscópio ótico Olympus com capacidade de aumento entre 10x e 1000x.

- o) Microdurômetro Shimadzu HMV-2T na escala Vickers (HV).
- p) Um paquímetro da marca Mitutoyo de resolução 0,05 mm.

3.3. Metodologia

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade do processo GMAW na soldagem de aço carbono com a adição de 1,3% de C_3H_6 ao CO_2 puro e 0,6% de C_3H_6 a mistura de $Ar+25\%CO_2$ em juntas de topo e de ângulo em passe unico. Para uma melhor organização, este estudo será dividido em três etapas.

A primeira etapa corresponde à determinação das faixas operacionais de trabalho para os parâmetros de soldagem, para cada gás de proteção utilizado, em que o processo apresente uma adequada estabilidade. As soldagens realizadas são do tipo cordão sobre a chapa. A partir das faixas de trabalho determinadas na primeira etapa, na segunda etapa foram realizadas as soldagens das chapas com juntas de topo com chanfro em V e juntas de ângulo em T, para avaliar os efeitos da adição de propileno aos gases convencionais em uma situação operacional. Na terceira etapa foi realizada uma avaliação dos efeitos da adição do propileno sobre as características e propriedades do metal de solda.

3.3.1. Etapa I

Para a determinação das faixas de trabalho com estabilidade mais adequada para a soldagem, as chapas de testes foram cortadas com dimensões específicas, e cordões de solda foram depositados sobre as mesmas. Para a realização das soldagens foram determinados dois valores de velocidade de alimentação de arame (V_{alim}), onde a tensão variou dentro de uma determinada faixa de valores. Os sinais elétricos produzidos foram registrados e analisados para avaliar a estabilidade do processo. Após a soldagem foi realizada uma avaliação através de ensaios de inspeção visual e líquido penetrante, para avaliar a incidência de possíveis descontinuidades.

3.3.1.1. A preparação das chapas

As chapas utilizadas são compostas pelo aço SAE 1020, cortadas nas dimensões de 200x50x6,35mm com o auxílio de uma serra elétrica, que utiliza uma mistura de água e óleo para resfriamento do conjunto. A figura 30 mostra o perfil da chapa que foi utilizada nas soldagens.

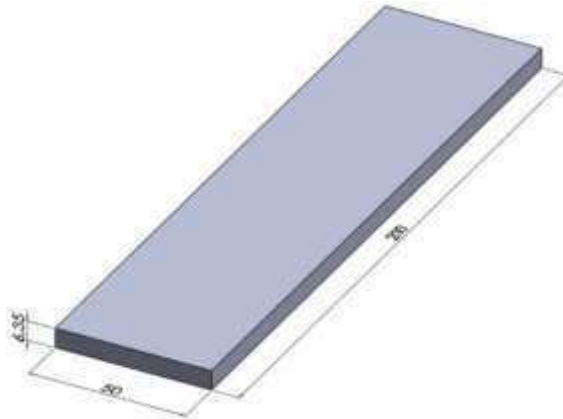


Figura 30 – Perfil da chapa de teste

Após o corte, as chapas foram limpas para a retirada de óleos, partículas e qualquer outro contaminante presente. Em seguida utilizou-se um disco de desbaste para a remoção da parte oxidada da superfície ou de rebarbas provenientes da etapa de corte.

3.3.1.2. Montagem do equipamento

Foi utilizado um trator de soldagem, responsável pela movimentação da tocha de soldagem. O trator possui um sistema de controle que permite o ajuste da velocidade de soldagem, além de um braço onde a tocha foi acoplada, que permite o ajuste do ângulo e da distância da tocha em relação a chapa.

3.3.1.3. Regulagem do equipamento

Inicialmente, foram selecionados alguns parâmetros que foram mantidos constantes durante todo o processo de soldagem. A tabela 8 lista os parâmetros fixos utilizados na soldagem durante a primeira etapa.

Tabela 8 – Parâmetros com valores constantes para a soldagem das chapas na Etapa I

Parâmetros	
Chapas de Teste	aço SAE 1020
Arame	ER70S-6, $\varnothing = 1,2$ mm
Soldagem	Mecanizada
Distância do bico de contato a peça	12 mm
Vazão do gás de proteção	15 l/min
Regulagem da Indutância	Fixa
Velocidade de Soldagem	300 mm/min
Tipo de soldagem	Cordão sobre a chapa

Após a regulagem dos parâmetros fixos foram determinados os parâmetros variáveis: a saber a tensão e a corrente de soldagem. Como o controle da corrente durante a soldagem é feito através do valor de V_{alim} , este foi ajustado de modo a se obter um intervalo de corrente apropriado.

Segundo a White Martins (2010), a faixa de corrente para o arame ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, com transferência metálica por curto-circuito varia de 120-230 A. Em seu trabalho, Ribeiro (2016), utilizando as mesmas misturas de gases com adição de C_3H_6 , utilizou as velocidades de alimentação de 4 m/min e 5 m/min, tendo como resultado uma variação de corrente na faixa de 150-230 A, sendo considerado satisfatório. Sendo assim esses valores de V_{alim} foram escolhidos e utilizados como ponto de partida para as soldagens realizadas na Etapa I.

Para os dois valores de V_{alim} utilizados, a tensão regulada na fonte foi gradualmente variada de 15 a 23 V. A cada cordão de solda depositado a tensão sofria um incremento de 1 V, de acordo com a seguinte ordem: a primeira soldagem foi realizada com 15 V, a segunda com 16 V, e assim sucessivamente até a tensão de 23V na última solda. Este procedimento foi realizado para cada um dos gases de proteção utilizados.

3.3.1.4. Aquisição dos sinais elétricos

A aquisição dos sinais elétricos gerados pelo equipamento de soldagem foi realizada através da utilização do sistema SAPv4, que foi detalhado no item 2.5.2. O sistema SAPv4 fornece os valores instantâneos de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão do gás de proteção gerados durante a soldagem através do seu painel e de conexões. Os acessórios conectados ao painel foram acoplados ao equipamento de soldagem para a captação dos sinais elétricos.

Os sinais foram registrados em intervalos de 0,2s. Devido a variações que ocorrem nos sinais elétricos no início e no fim da soldagem, a captação de dados foi realizada no intervalo de 10 a 35 s de um tempo de soldagem estimado de 45s por cordão. O tratamento estatístico dos dados obtidos foi realizado diretamente pelo sistema SAPv4.

3.3.1.5. Análise Qualitativa

Após a deposição dos cordões de solda sobre as chapas, foi realizada uma análise visual prévia, com o objetivo de detectar possíveis descontinuidades, níveis de escória e respingos retidos. Em seguida a superfície dos cordões de solda foi escovada com o auxílio de uma escova de aço rotativa, e com iluminação apropriada realizou-se uma inspeção visual para detecção de descontinuidades como: trincas, falta de fusão e penetração, poros, mordeduras, etc. A inspeção está de acordo com a norma PR-50 (ABENDI, 2011).

Após a inspeção visual as chapas soldadas foram testadas pelo ensaio não destrutivo de líquido penetrante, que tem como objetivo a análise de descontinuidades superficiais não visíveis a olho nu. A aplicação do líquido penetrante e do revelador foi realizada por profissional qualificado, seguindo a norma PR-001 (ABENDI, 2008). Para realização da análise qualitativa não foram consideradas as extremidades dos cordões de solda, já que, os sinais elétricos que foram considerados para a análise não contemplam estas regiões.

3.3.1.6. Análise dos sinais elétricos

A estabilidade do processo GMAW pode ser medida através da repetibilidade de parâmetros como a tensão e a corrente. Com base nos sinais elétricos registrados pelo sistema SAPv4 foi possível calcular os índices de estabilidade para o processo GMAW, conforme descrito no item 2.5.1 da revisão bibliográfica. A estabilidade da transferência metálica foi analisada através da utilização dos seguintes índices:

- 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);
- d) Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc).

Para realizar a avaliação dos índices de estabilidade foram construídos gráficos que mostram a variação dos valores dos índices de estabilidade em função do valor da tensão aplicada. Como mostrado anteriormente, a estabilidade do processo tende a ser maior conforme os valores dos índices diminuem. Os intervalos de tensão em que os índices de estabilidade apresentam os menores valores indica a faixa operacional do processo, em que a estabilidade é considerada a mais adequada para a soldagem. A partir da análise dos gráficos foi possível determinar para cada valor de V_{alim} e gás de proteção utilizado a faixa operacional de trabalho característica.

3.3.1.7. Determinação dos parâmetros da Etapa II

Os parâmetros fixos utilizados na Etapa II foram os mesmos da Etapa I, como mostrados na tabela 8. Os valores de tensão de trabalho foram escolhidos com base nas faixas operacionais determinadas nas análises qualitativa e quantitativa realizadas na Etapa I.

3.3.2. Etapa II

Após a determinação da tensão de trabalho feita na Etapa I, foram realizadas soldagens em chapas previamente preparadas com juntas de topo com chanfro em V e juntas de ângulo em T. Durante a soldagem, os sinais elétricos gerados foram registrados para a avaliação da estabilidade do processo para cada gás de proteção e tipo de junta utilizados. Após a soldagem, as chapas de teste foram analisadas através de inspeção visual e ensaio de líquido penetrante para avaliar a presença de possíveis descontinuidades. As chapas foram pesadas antes e após a soldagem para a determinação da taxa de deposição, enquanto a escória e respingos foram coletados e quantificados. Por fim, seções transversais das soldas foram preparadas metalograficamente para a realização da análise da geometria dos cordões de solda.

3.3.2.1. A preparação para a soldagem

3.3.2.1.1. Preparação das chapas

Para analisar a viabilidade da aplicação de gases com adição de propileno ao processo GMAW, foram executadas soldagens em dois tipos de junta: juntas de topo com chanfro “V” na posição plana e juntas de ângulo em T na posição horizontal. A utilização de juntas durante a soldagem visa simular uma aplicação operacional, já que a velocidade de resfriamento nessa situação é maior, se comparada a soldagem do tipo cordão sobre a chapa, o que resulta em uma microestrutura diferenciada, e em diferentes níveis de tensões residuais. As dimensões (em mm) e as geometrias das juntas e dos corpos de prova são mostradas na figura 31.

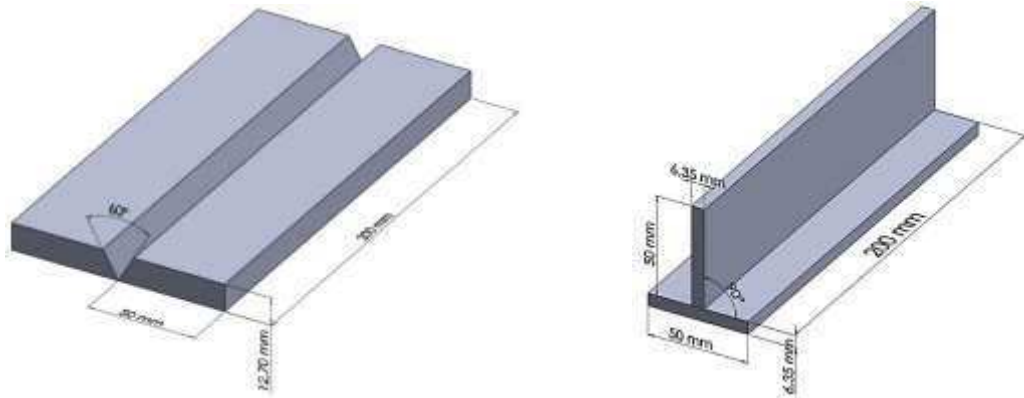


Figura 31 – Especificações das juntas de soldagem: a) Topo com chanfro em V, b) Ângulo em T

As chapas foram cortadas com o auxílio de uma serra elétrica com a capacidade de realizar cortes em ângulo, e posteriormente limpas e a oxidação superficial e rebarbas removidas utilizando um disco de desbaste.

3.3.2.1.2. Montagem do equipamento

Para realizar a movimentação da tocha novamente foi utilizado o trator de soldagem. A tocha foi acoplada ao braço do trator e posicionada perpendicularmente em relação as chapas com junta em V, e em um ângulo de 45° em relação a base da junta de ângulo.

Durante a soldagem foi utilizado um coletor em formato de caixa, como mostra a figura 32, para realizar a coleta dos respingos e escória gerados.



Figura 32 - Coletor de respingos.

3.3.2.3. Análise qualitativa

Os ensaios de inspeção visual e líquido penetrante foram realizados nas juntas soldadas, seguindo as normas, como descrito no item 3.3.1.4 da Etapa I. Assim como na etapa I, as extremidades dos cordões de solda não serão consideradas para a análise.

3.3.2.4. Avaliação dos sinais elétricos

A análise dos sinais elétricos foi feita com o intuito de realizar um comparativo da estabilidade do processo com utilização dos gases convencionais em relação aos gases com a adição de C_3H_6 .

A partir dos dados obtidos, foram calculados os índices de estabilidade, como descrito na seção 2.5.1. Os índices de estabilidade utilizados na Etapa II foram os mesmos da Etapa I. Foram construídos gráficos que mostram como os índices de estabilidade variam de acordo com o gás de proteção e valor de V_{alim} para os dois tipos de juntas utilizados. A partir dos gráficos foi possível avaliar as alterações na estabilidade do processo provocadas pela adição de C_3H_6 .

3.3.2.5. Taxa de respingos e Taxa de escória

Durante a soldagem dos corpos de prova os respingos e escória gerados, que ficaram retidos no coletor de respingos, nas chapas e no bocal da tocha de soldagem foram coletados e armazenados.

Os respingos foram separados da escória com a utilização de um imã, armazenados separadamente e posteriormente pesados em balança com resolução de 0,001 g. A seguir foram calculadas a taxa de respingos e a taxa de escória para cada um dos gases de proteção utilizados.

A taxa de respingos (T_{res}) é representada pela quantidade de respingos (soma da massa dos respingos no coletor com a massa dos respingos aderidos nas chapas e no bocal da tocha) dividido pelo tempo de soldagem total das chapas (ΣTS). A unidade dessa equação é grama por segundo.

$$T_{res} = \frac{Q_{res} (g)}{\sum TS (s)} \quad \text{equação 1}$$

Onde,

T_{res} = Taxa de respingo;

Q_{res} = Quantidade de respingo.

TS = tempo de soldagem

A taxa de escória (T_{esc}) corresponde a quantidade de escória gerada pelo tempo total de soldagem das chapas, que possui unidade em gramas por segundo, calculada pela equação:

$$T_{esc} = \frac{Q_{esc} (g)}{\sum TS (s)} \quad \text{equação 2}$$

Onde,

T_{esc} = Taxa de escória;

Q_{esc} = Quantidade de escória;

3.3.2.6. Taxa de deposição

Para o cálculo da taxa de deposição as chapas de teste foram pesadas antes e após a soldagem, utilizando uma balança de resolução de 0,1g. A partir destes valores foi possível determinar a quantidade de metal depositado pela diferença dos pesos dos corpos de prova após e antes da soldagem.

Com isso torna-se possível os cálculos das taxas de deposição (T_d) para analisar a influência dos gases de proteção utilizados. A taxa de deposição é calculada através da razão entre a massa do cordão de solda e o tempo de soldagem da chapa, sendo este último gerado diretamente pelo sistema em ms. As unidades devem ser convertidas para se obter a taxa de deposição em kg/h, que é calculada através da expressão:

$$\text{Taxa de deposição } \left(\frac{kg}{h}\right) = \frac{\text{massa do cordão de solda}}{\text{tempo soldando a peça}} \quad \text{equação 3}$$

3.3.2.7. Análise Geométrica

A análise da geometria do cordão de solda depositado foi realizada através do corte e preparação metalográfica de uma seção transversal da chapa de teste. A preparação foi realizada através do lixamento com lixas de granulometria de 100 a 600 mesh, mantendo sempre o lixamento na direção perpendicular aos riscos deixados na etapa anterior, e ataque químico com solução de Nital 5%, para revelar as regiões da junta soldada. Posteriormente foi aplicado verniz para proteger a região de contaminação e oxidação e a seção transversal foi fotografada para a realização de medições. A preparação metalográfica permitiu a identificação das dimensões dos cordões por meio de macrografias, como mostram as figuras 33 e 34.

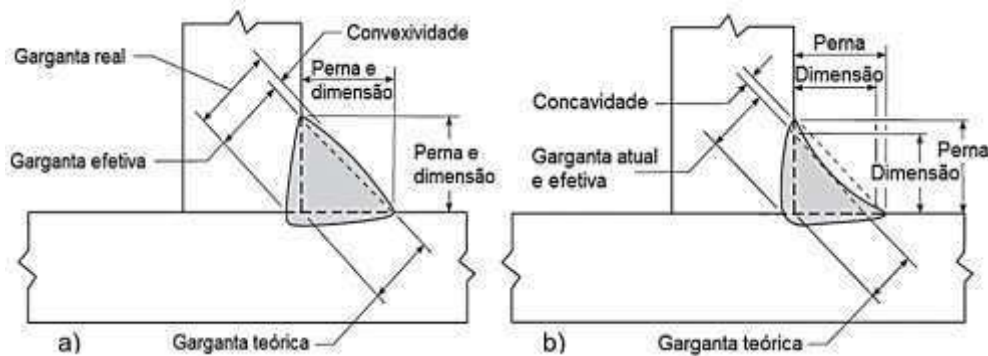


Figura 33 - Parâmetros geométricos do cordão de filete em junta tipo "T"

Fonte: ESAB (2005)

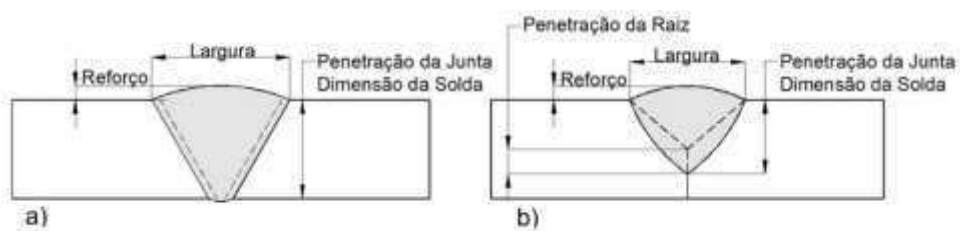


Figura 34 - Parâmetros geométricos do cordão de solda em junta do tipo "V" com penetração: a) Total e b) Parcial. Fonte: AWS (2001)

As medições da região do cordão foram realizadas com a utilização de um paquímetro. Os resultados foram comparados para avaliar possíveis alterações na geometria das juntas causadas pela adição de C_3H_6 .

3.3.3. Etapa III

O objetivo desta etapa foi avaliar os efeitos da adição do propileno sobre as características do metal de solda depositado. Esta avaliação foi realizada através da análise da microestrutura e da dureza do cordão de solda, e da posterior comparação dos resultados obtidos para os diferentes gases de proteção utilizados.

3.3.3.1. Análise microestrutural

A análise microestrutural visa identificar os constituintes da zona fundida do cordão de solda. Para cada um dos gases de proteção utilizados, foi selecionada uma amostra da seção transversal de um cordão de solda, que foi preparada metalograficamente, de acordo com as seguintes etapas:

- a) Corte: a peça foi cortada em dimensões adequadas para análise metalográfica sem que haja qualquer dano à estrutura original do material.
- b) Embutimento a quente: a amostra foi embutida em resina baquelítica através de uma prensa utilizando-se pressão e temperatura por tempo suficiente para que aconteça a polimerização da resina.
- c) Lixamento: a amostra passou pela etapa de lixamento com as lixas de granulometrias de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Mantendo sempre o lixamento na direção perpendicular aos riscos deixados pelo lixamento anterior
- d) Polimento: o polimento foi realizado para reduzir a espessura da camada estruturalmente danificada pelo lixamento, removendo todos os riscos superficiais gerados, de modo semiautomático utilizando pasta abrasiva de alumina, sequencialmente, de granulometria igual a 1 μm , 0,3 μm e 0,05 μm , respectivamente.
- e) Ataque químico: para que as microestruturas do metal de solda sejam reveladas através da dissolução seletiva, foi realizado ataque químico com solução de Nital 2% por um período de aproximadamente 1 à 5s.

A identificação dos microconstituintes foi feita através de análise no microscópio Olympus LX41, sendo que para identificar os microconstituintes presentes no metal de solda foi utilizado o trabalho de Perdigão (1987)

O trabalho de Perdigão (1987) somente trata dos constituintes principais da microestrutura que podem ser encontrados no metal de solda de aços ferríticos. A tabela 10 mostra a nomenclatura dos constituintes principais, além de uma breve descrição dos mesmos.

**Tabela 10 - Microestruturas principais do metal de solda
Adaptado de Silva, et.al. (2001)**

Constituinte	Código	Descrição
- Ferrita Primária	PF(G)	Veios de grãos poligonais associados com os contornos austeníticos prévios.
- Ferrita Poligonal Intragranular	PF(I)	Grãos de ferrita usualmente poligonais, localizados dentro dos grãos austeníticos prévios e mais 3 vezes maiores do que os grãos ou lâminas adjacentes de ferrita.
- Ferrita Acicular	AF	Grãos de ferrita pequenos e não alinhados localizados no interior dos grãos austeníticos prévios. Uma região de AF comumente inclui placas isoladas de grande razão de forma (relação entre o maior e o menor eixo).
- Ferrita com Segunda Fase Alinhada	FS(A)	Duas ou mais placas paralelas de ferrita. No caso de apenas duas placas, a razão de forma deve ser maior do que 4:1. Se o operador tiver segurança, este constituinte pode ser sub-classificado como placa lateral de ferrita, bainita superior ou inferior, FS(SP), FS(UB) ou FS(LB).
- Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada	FS(NA)	Ferrita envolvendo completamente ou (i) "microfases" aproximadamente equiaxiais ou distribuídas aleatoriamente ou (ii) lâminas isoladas de AF.
- Agregado Ferrita Carboneto	FC	Estruturas finas de ferrita e carboneto, incluindo ferrita com carbonetos "interfásicos" e perlita. Se o agregado é claramente identificado como perlita, ele deve ser designado como FC(P). Se o agregado for menor que as lâminas adjacentes dentro do grão austenítico prévio, ele deve ser desprezado.
- Martensita	M	Colônias de martensita maiores que as lâminas adjacentes de ferrita. Se o operador estiver seguro, o constituinte pode ser classificado como martensita laminar ou maclada, M(L) ou M(T).

3.3.3.2. Dureza Vickers

O ensaio de dureza foi realizado de acordo com a norma ISO 6507-1 (2018). A dureza Vickers foi medida ao longo das três regiões da junta, metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF), utilizando uma amostra para cada gás de proteção, com o durômetro calibrado para uma carga

de um quilo e uma impressão com duração de 10 segundos. A partir dos resultados obtidos a dureza Vickers foi calculada através da equação:

$$\mathbf{HV} \left(\frac{\mathbf{Kg}}{\mathbf{mm}^2} \right) = \frac{\mathbf{1854 \cdot F}}{\mathbf{d}^2} \quad \mathbf{equação \ 4}$$

Onde:

F = carga aplicada;

d = diagonal da impressão regular quadrática.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Etapa I

4.1.1. Soldagem das Chapas

Os testes iniciais foram feitos utilizando como ponto de partida os mesmos valores de V_{alim} utilizados por Ribeiro (2016). Foi verificado que a corrente variava entre 155 a 190 A para a V_{alim} de 4 m/min, e 200 a 230 A para a V_{alim} de 5 m/min, que se mostraram adequadas para a realização dos testes. Sendo assim, as V_{alim} de 4 m/min e 5 m/min foram confirmadas para a realização das soldas nas etapas 1 e 2.

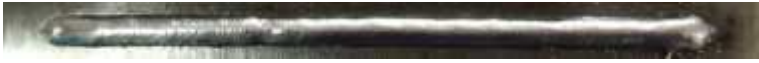


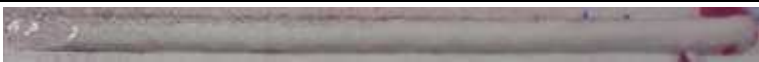
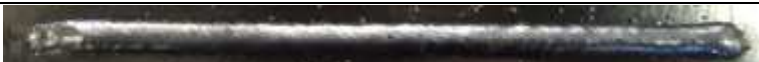
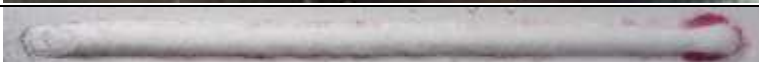


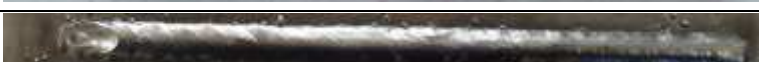




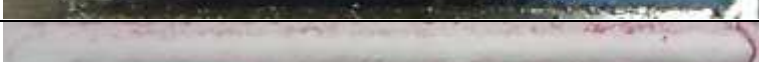


4.1.2. Análise Qualitativa

A análise qualitativa dos cordões de solda foi realizada por meio dos ensaios de Inspeção Visual (IP) e Líquido Penetrante (LP). Os resultados dos ensaios são detalhados a seguir:

- Ar+25%CO₂ – V_{alim} de 4 m/min

A tabela 11 mostra os resultados dos ensaios de IV e LP para as soldas utilizando Ar+25%CO₂ com V_{alim} 4 m/min. Os cordões de solda apresentaram aparência uniforme, sem indicação de descontinuidades. Foi observado que os cordões com as tensões de 15, 16 e 17 V mostraram melhor aparência com relação aos demais, com menor quantidade de respingos e menor nível de ruído durante a soldagem. Com a tensão igual ou acima de 18 V, houve um aumento na quantidade de respingos gerados, observando-se que quanto maior a tensão, maior era a quantidade e diâmetro dos respingos. Este comportamento indica um aumento da instabilidade do processo. A quantidade de escória gerada foi relativamente baixa, assim como a quantidade de fumos.

Tabela 11 - Ensaio de IV e LP das soldas com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 4 m/min







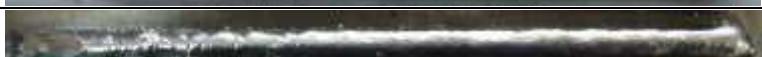
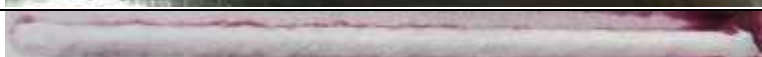

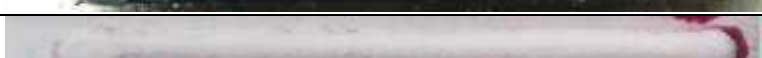

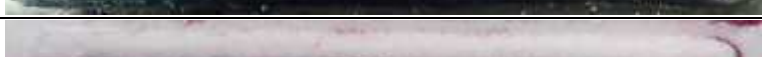

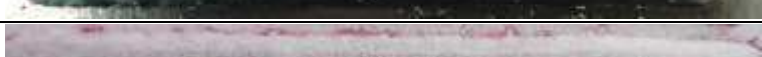


Tensão	Ensaio	Cordão
15	IV	
	LP	
16	IV	
	LP	
17	IV	
	LP	
18	IV	
	LP	
19	IV	
	LP	
20	IV	
	LP	
21	IV	
	LP	
22	IV	
	LP	

- Ar+25%CO₂ – V_{alim} de 5 m/min

A tabela 12 mostra os resultados dos ensaios de IV e LP para as soldas utilizando Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 5 m/min. Após avaliação foi possível notar que os cordões de solda produzidos possuíam boa aparência e não apresentavam indicativos de descontinuidades. Entretanto, as tensões de 15,16,17 e 18 V apresentaram melhor aparência, além de menor quantidade de respingos e escoria, quando comparados aos demais. Os cordões gerados com tensões de 19 a 22 V também apresentaram uma boa aparência, indicando uma relativa estabilidade, no entanto foi possível perceber uma elevação na quantidade de

respingos gerados e retidos, que apesar de pequena, aponta um aumento na instabilidade do processo. Após o ensaio de LP, não foi perceptível qualquer indicio de descontinuidades.

Tabela 12 - Ensaio de IV e LP das soldas com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 5 m/min





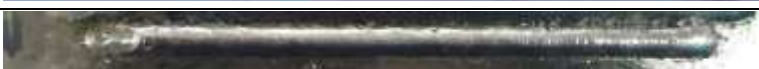
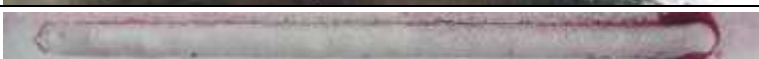
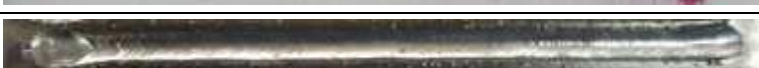



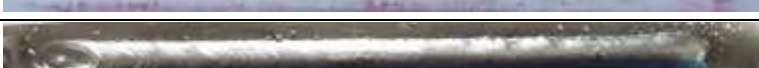
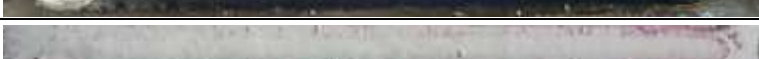

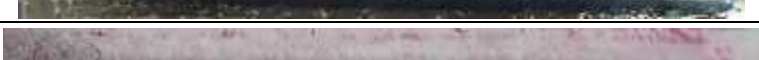


Tensão	Ensaio	Cordão
15	IV	
	LP	
16	IV	
	LP	
17	IV	
	LP	
18	IV	
	LP	
19	IV	
	LP	
20	IV	
	LP	
21	IV	
	LP	
22	IV	
	LP	

- Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ – V_{alim} de 4 m/min

A tabela 13 mostra os resultados dos ensaios de IV e LP para as soldas utilizando Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min. Durante a soldagem, foi observado que todos os cordões produzidos possuíam boa aparência, com pouca produção de respingos, porém, os cordões produzidos com a tensão de 15, 16 e

17 V apresentaram melhor desempenho operacional, com menor quantidade de respingos e ruído. Os cordões gerados com tensões de 18 a 22 V, apesar da boa aparência, apresentaram maior quantidade de respingos e escória, além de produzir ruído não uniforme. O ensaio de LP não revelou indícios de descontinuidades nos cordões de solda.

Tabela 13 - Ensaio de IV e LP das soldas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min


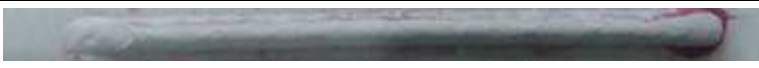


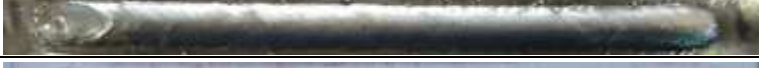


Tensão	Ensaio	Cordão
15	IV	
	LP	
16	IV	
	LP	
17	IV	
	LP	
18	IV	
	LP	
19	IV	
	LP	
20	IV	
	LP	
21	IV	
	LP	
22	IV	
	LP	

- Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ – V_{alim} de 5 m/min

A tabela 14 mostra os resultados dos ensaios de IV e LP para as soldas utilizando Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} 5 m/min. Não foi possível realizar soldas

com tensões inferiores a 17 V, sendo que, durante as tentativas de soldagem com tensões de 15 e 16 V ocorreram pequenas explosões, com a geração de respingos de elevadas dimensões, sendo a soldagem interrompida logo no início. As soldas realizadas com tensões a partir de 17 V apresentaram boa aparência e uniformidade, sendo que as tensões de 17, 18 e 19 V foram as que apresentaram os melhores resultados, com quantidades reduzidas de respingos e ruído uniforme. Já as soldas realizadas com tensão igual ou acima de 20 V, apesar da boa aparência apresentaram maiores quantidades de respingos e escoria. Nenhum indicio de descontinuidades foi revelado pelo ensaio de LP.

Tabela 14 - Ensaio de IV e LP das soldas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 5 m/min

Tensão	Ensaio	Cordão
15	IV	
	LP	-
16	IV	
	LP	-
17	IV	
	LP	
18	IV	
	LP	
19	IV	
	LP	
20	IV	
	LP	
21	IV	
	LP	
22	IV	
	LP	

- CO₂ – V_{alim} de 4 m/min

A tabela 15 mostra os resultados dos ensaios de IV e LP para as soldas utilizando CO₂ e V_{alim} de 4 m/min. Nas tensões de 17 e 18 V foram observados estreitamento dos cordões de solda. Ainda na tensão de 17 V, foi possível notar que o cordão se apresentou muito alto e estreito e foi observada a presença de uma linha vermelha após o ensaio de LP, indicando a presença de descontinuidades. Foi possível observar que a tensão de 17 V era muito instável, apresentando elevada quantidade de respingos e oscilação dos ruídos. Já com a tensão de 18 V, ocorreu uma considerável redução no nível de respingos e ruídos gerados, comportamento que se manteve até a tensão de 21 V. A partir de 22 V tanto os respingos quanto ruídos voltaram a se elevar, o que indica um aumento na instabilidade do processo. Com exceção da solda com tensão de 17 V, nenhuma outra solda apresentou indícios de descontinuidades.

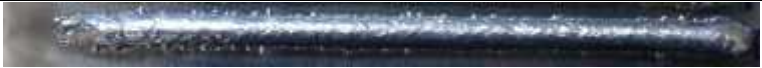

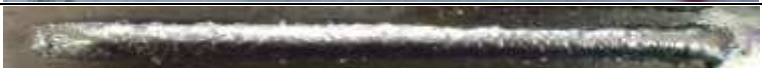
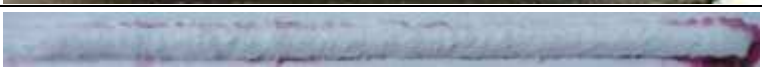

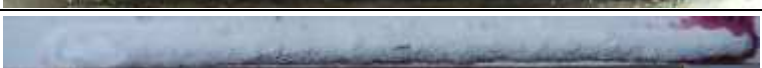





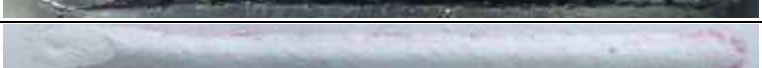
Tabela 15 - Ensaios de IV e LP das soldas com CO₂ e V_{alim} de 4 m/min

Tensão	Ensaio	Cordão
17	IV	
	LP	
18	IV	
	LP	
19	IV	
	LP	
20	IV	
	LP	
21	IV	
	LP	
22	IV	
	LP	

- CO₂ – V_{alim} de 5 m/min

A tabela 16 mostra os resultados dos ensaios de IV e LP para as soldas utilizando CO₂ e V_{alim} de 5 m/min. As soldas na tensão de 17 V e 18 V apresentaram elevada instabilidade, sendo que a solda com tensão de 17 V foi interrompida logo no início, pois foram observadas pequenas explosões, com separação violenta das gotas, pelo fato do eletrodo mergulhar na poça de fusão, indicando elevada instabilidade do processo. O ensaio de LP ainda acusou a presença de descontinuidades no cordão solda com tensão de 18 V. Quando a tensão foi de 19 V, houve uma redução da produção de respingos e os ruídos se tornaram mais uniformes, com o processo prosseguindo desta forma até a tensão de 22 V, indicando adequada estabilidade do processo. Com a tensão de 23 V foi observado um aumento da quantidade de respingos gerados, com produção de ruídos não uniformes, sendo um indicativo de instabilidade do processo. Além da tensão de 18 V, nenhum outro cordão de solda apresentou indícios de descontinuidades após o ensaio de LP.

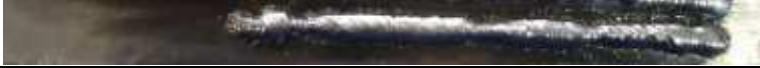




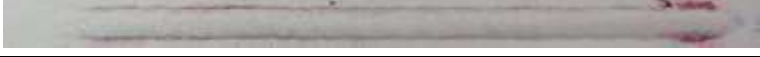

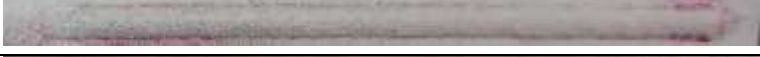

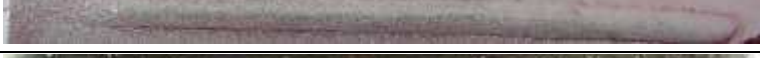


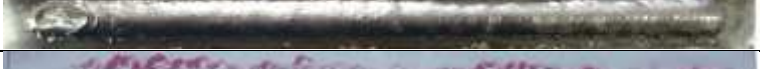
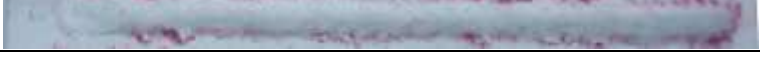
Tabela 16 - Ensaios de IV e LP das soldas com CO₂ e V_{alim} de 5 m/min

Tensão	Ensaio	Cordão
18	IV	
	LP	
19	IV	
	LP	
20	IV	
	LP	
21	IV	
	LP	
22	IV	
	LP	
23	IV	
	LP	

- $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ – V_{alim} de 4 m/min

A tabela 17 mostra os resultados dos ensaios de IV e LP para as soldas utilizando $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} 4 m/min. A tensão de 17 V se mostrou altamente instável, apresentando elevada geração de respingos, com desprendimento violento, além de uma grande oscilação dos níveis de ruído. O ensaio de LP ainda revelou a presença de descontinuidades no cordão de 17 V. O aumento da tensão para 18 V acarretou em melhora significativa da estabilidade, com diminuição da quantidade de respingos e ruído uniforme, se mantendo assim até a tensão de 21 V. Já a partir da tensão de 22 V, os níveis de respingos e ruído voltaram a se elevar, resultando em elevada instabilidade do processo. A tensão de 23 V mostrou uma quantidade elevada de respingos retidos, além de exibir uma aparência não uniforme, indicando instabilidade do processo. Apenas a tensão de 17 V apresentou indicativos de descontinuidades após o ensaio de LP.

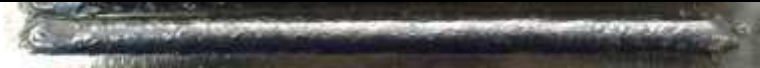
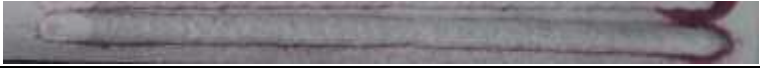

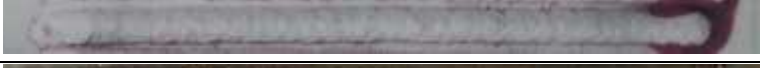
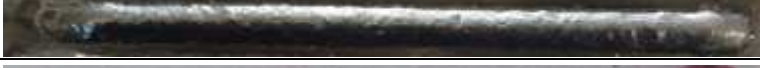


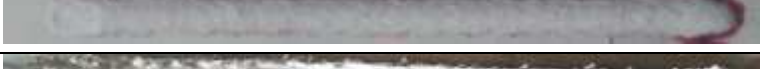


Tabela 17 - Ensaio de IV e LP das soldas com $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 4 m/min

Tensão	Ensaio	Cordão
17	IV	
	LP	
18	IV	
	LP	
19	IV	
	LP	
20	IV	
	LP	
21	IV	
	LP	
22	IV	
	LP	
23	IV	
	LP	

- $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ – V_{alim} de 5 m/min

A tabela 18 mostra os resultados dos ensaios de IV e LP para as soldas utilizando $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 5 m/min. Não foi possível a realização de cordões de solda com tensão inferior a 19 V, pois houve elevada instabilidade, com o eletrodo mergulhando diversas vezes na poça de fusão, com elevada geração de respingos. Com a tensão de 19 V houve baixa geração de respingos e ruído mais uniforme, comportamento que se manteve até a tensão de 22 V. Já com a tensão de 23 V os níveis de respingos e ruído voltaram a se elevar, evidenciando o aumento da instabilidade. O ensaio de LP não revelou indícios de descontinuidades nos cordões de solda.

Tabela 18 - Ensaios de IV e LP das soldas com $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 5 m/min

Tensão	Ensaio	Cordão
19	IV	
	LP	
20	IV	
	LP	
21	IV	
	LP	
22	IV	
	LP	
23	IV	
	LP	

4.1.2.1. Avaliação qualitativa dos resultados

Através dos resultados da análise qualitativa, foi possível realizar as seguintes observações:

- Em relação ao formato e aparência do cordão de solda, foi observado que para tensões mais baixas, os cordões de solda se apresentaram mais estreitos e com maior reforço, e a medida que a tensão aumenta se tornam cada vez mais largos e com menor reforço, assumindo um comportamento como o descrito por Rezende *et al.*, (2011) em seu trabalho.
- Em relação a geração de respingos e escória, observou-se que a quantidade de respingos aumentou consideravelmente com o aumento de tensão nas soldagens com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, indicando que a faixa operacional desses gases ocorre em valores baixos de tensão, entre 15 a 18 V. No caso do CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆ foi observado que a quantidade de respingos retidos diminui com o aumento da tensão, se estabiliza durante uma determinada faixa e volta a aumentar conforme a tensão continua a se elevar, mostrando que para estes gases a faixa operacional se encontra em valores de tensão entre 18 a 22 V.
- Em relação ao comportamento apresentado durante a soldagem com os quatro gases, principalmente com relação a geração de respingos, está de acordo com o descrito por Kang et al. (2003). Os autores mostraram que a quantidade de respingos decresce com o aumento da tensão, atinge um mínimo em um determinado valor ou faixa de tensão, e então a volta a se elevar com o aumento da tensão.
- Em relação ao ensaio de LP, foi possível perceber que a maioria dos cordões de solda não apresentaram indícios de descontinuidades. As exceções foram com relação aos cordões soldados com 17 V, 18 V e 23 V nos gases CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆, para ambos os valores de V_{alim}, onde o ensaio de LP acusou a presença de descontinuidades.

4.1.2.1.1. Determinação das faixas operacionais qualitativas

A tabela 19 apresenta as faixas operacionais definidas com base na análise qualitativa dos cordões de solda, para cada um dos gases de proteção e valores de V_{alim} utilizados.

Tabela 19 - Faixas de estabilidade definidas com base na análise qualitativa

Gás	V _{alim} (m/min)	Faixa operacional (V)
Ar+25%CO ₂	4	15-17
	5	15-18
CO ₂	4	18-21
	5	19-22
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	4	15-18
	5	17-19
CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆	4	18-21
	5	19-22

4.1.3. Análise da estabilidade do arco elétrico

A partir dos sinais elétricos gerados foram calculados o desvio padrão de picos de corrente (DPPC), o desvio padrão de período de arco aberto (DPAA), o desvio padrão de período de curto-circuito (DPCC) e do índice Vilarinho de regularidade na transferência por curto-circuito (IVcc) para cada uma das misturas de gases utilizadas. Os resultados obtidos são detalhados a seguir:

- Ar+25%CO₂ - V_{alim} de 4 m/min

A tabela 20 e a figura 35 mostram os índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas que utilizaram Ar+25%CO₂ com V_{alim} de 4 m/min. As tensões de 15 e 16 V apresentaram os menores valores para os índices de estabilidade. Com a tensão de 17 V ocorre um aumento dos valores dos índices de estabilidade, que continuam a aumentar até a tensão de 22 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostram que a faixa operacional se encontra entre 15 a 17V, o que está de acordo com o que foi observado durante a etapa de análise qualitativa, onde as soldas correspondentes apresentaram melhor aparência e bom desempenho operacional.

Tabela 20 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 4m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	Im (A)	DPPC (ms)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	Ivcc
Ar+25%CO ₂	4	15	183,4	30,4	0,8	0,6	0,339
		16	182,2	26,6	0,9	0,5	0,323
		17	187,9	39,2	2,5	0,7	0,661
		18	178,7	57,5	4,7	0,9	1,003
		19	178,0	71,7	6,7	1,0	1,085
		20	179,4	82,5	8,0	1,2	1,356
		21	177,2	90,5	9,9	1,2	1,395
		22	176,9	119,6	16,6	1,3	1,464

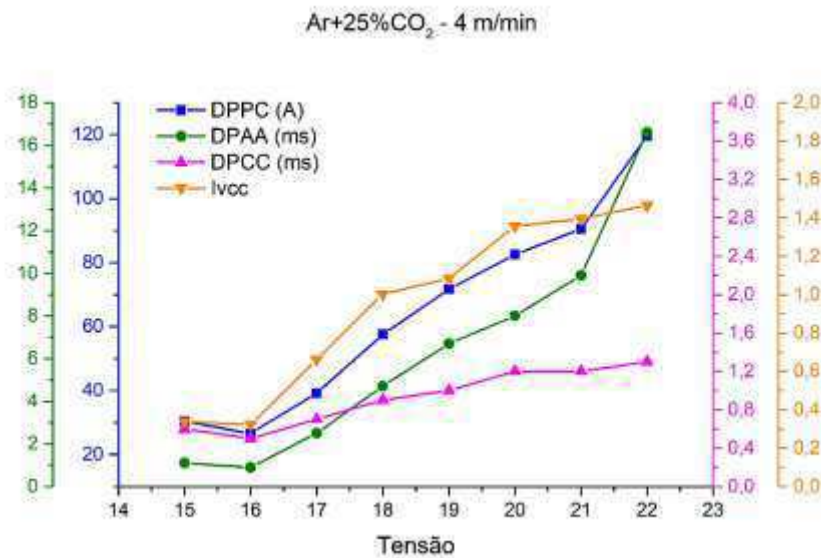


Figura 35 – Índices da estabilidade das soldas com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 4 m/min

- Ar+25%CO₂ - V_{alim} de 5 m/min

A tabela 21 e a figura 36 mostram os índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas que utilizaram Ar+25%CO₂ com a V_{alim} de 5 m/min. Como pode ser observado, o intervalo de 15 a 17 V apresenta os menores valores para os índices de estabilidade. No entanto a tensão de 15 V que apresenta um valor de DPCC de 1,2 ms, o maior valor registrado entre todas as tensões. Porém a variação do DPCC foi muito pequena durante a realização das soldas. A partir de 18 V, foi observado um aumento nos valores dos índices

de estabilidade, que continuaram crescentes até a tensão de 22 V. É possível observar que a faixa operacional indicada pelos índices de estabilidade, entre 15 a 17 V, está de acordo com os resultados obtidos na análise qualitativa.

Tabela 21 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 5 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	I _m (A)	DPPC (ms)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	I _{vcc}
Ar+25%CO ₂	5	15	206,0	45,6	1,4	1,2	0,570
		16	207,9	39,3	1,3	1,0	0,527
		17	222,8	40,3	1,5	1,0	0,509
		18	209,0	51,3	2,7	1,0	0,897
		19	208,2	61,7	3,5	1,0	1,081
		20	211,4	73,5	4,4	1,1	1,305
		21	210,6	77,3	4,9	1,1	1,406
		22	208,3	104,0	8,4	1,1	1,603

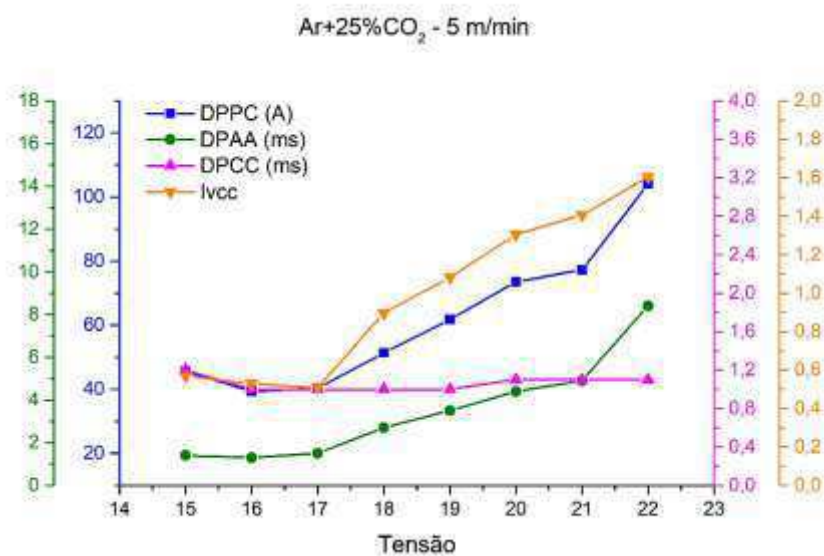


Figura 36 – Índices da estabilidade das soldas com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 5 m/min

- Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ - V_{alim} de 4 m/min

A tabela 22 e a figura 37 mostram os índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas que utilizaram Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ com a V_{alim} de 4 m/min. O intervalo de 15 a 18 V apresentou os menores valores para os índices de estabilidade. Com a tensão de

19 V ocorre um aumento dos valores dos índices de estabilidade, que continuaram crescentes até a tensão de 22 V. A faixa operacional ficou localizada entre 15 a 18 V, a mesma faixa indicada pela análise qualitativa, com as soldas apresentando menores quantidades de respingos e melhor aparência.

Tabela 22 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos pelas soldas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	Im (A)	DPPC (ms)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	Ivcc
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	4	15	180,0	37,7	3,6	0,7	1,032
		16	175,8	33,0	2,3	0,5	0,738
		17	191,4	44,3	2,3	0,8	0,746
		18	178,5	49,4	3,2	0,8	0,864
		19	179,8	60,1	4,7	1,0	1,066
		20	176,2	74,9	7,0	1,1	1,181
		21	174,0	62,6	6,3	1,0	1,102
		22	163,8	75,6	8,8	1,2	1,075

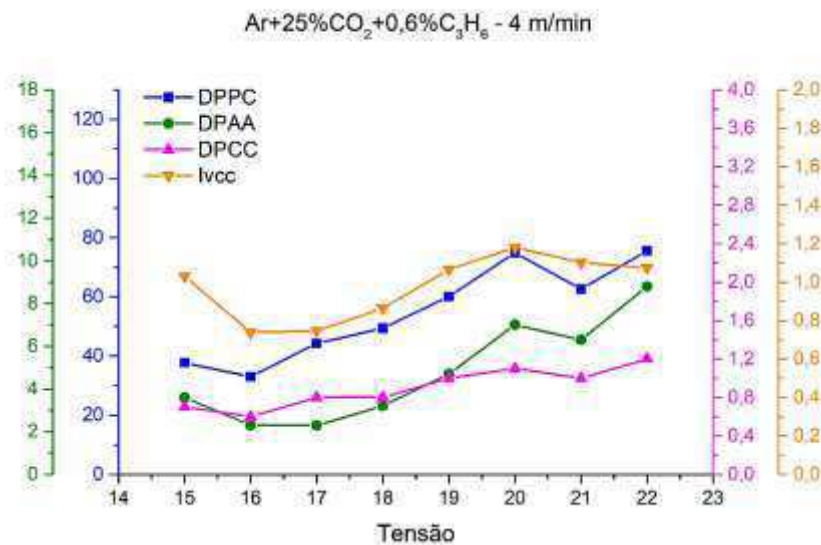


Figura 37 – Índices da estabilidade das soldas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min

- Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ - V_{alim} de 5 m/min

A tabela 23 e a figuram 38 mostram os índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas que utilizaram Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ com a V_{alim} de 5 m/min. Como foi visto na análise

qualitativa, não foi possível utilizar tensão menor que 17 V. As tensões de 17 a 19 V apresentaram os menores valores para os índices de estabilidade, sendo que estes valores aumentavam conforme a tensão se elevava. A partir da tensão de 20 V é possível observar uma diminuição na taxa de crescimento dos valores dos índices de estabilidade. Assim como na análise qualitativa, a faixa operacional se encontra entre 17 a 19 V de acordo com os valores dos índices de estabilidade

Tabela 23 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 5 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	Im (A)	DPPC (ms)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	lvcc
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	5	17	203,6	34,2	1,3	0,8	0,496
		18	202,6	41,3	2,2	0,9	0,730
		19	200,2	50,7	3,0	0,9	0,885
		20	198,2	63,7	4,2	1,1	1,075
		21	196,5	63,8	4,6	1,1	1,079
		22	203,7	54,7	3,5	0,9	0,798

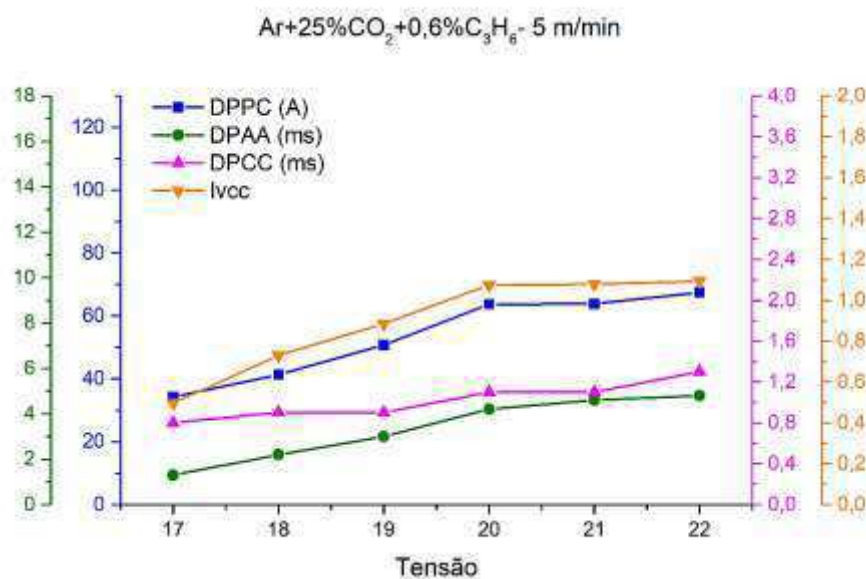


Figura 38 – Índices da estabilidade das soldas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 5 m/min

- CO₂ - V_{alim} de 4 m/min

A tabela 24 e a figura 39 mostram os índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas que utilizaram CO₂ com a V_{alim} de

4 m/min. A tensão de 17 V apresenta valores elevados dos índices de estabilidade. Com a tensão de 18 V ocorre uma queda nos valores dos índices. A faixa de 18 a 21 V apresenta os menores valores para os índices de estabilidade. Na tensão de 22 V ocorre um aumento nos valores dos índices, indicando uma elevação da instabilidade do processo. Em comparação com a análise qualitativa, a faixa operacional indicada pelos índices de estabilidade é a mesma, com a tensão variando entre 18 a 21 V.

Tabela 24 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com CO₂ e V_{alim} de 4 m/min.

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	I _m (A)	DPPC (ms)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	I _{vcc}
CO ₂	4	17	181,3	57,7	3,5	1,9	0,961
		18	171,6	53,3	1,8	1,2	0,644
		19	171,3	52,2	2,1	1,1	0,654
		20	168,3	46,5	2,5	1,0	0,713
		21	166,9	53,4	3,1	0,9	0,772
		22	160,3	72,0	6,2	1,1	1,032

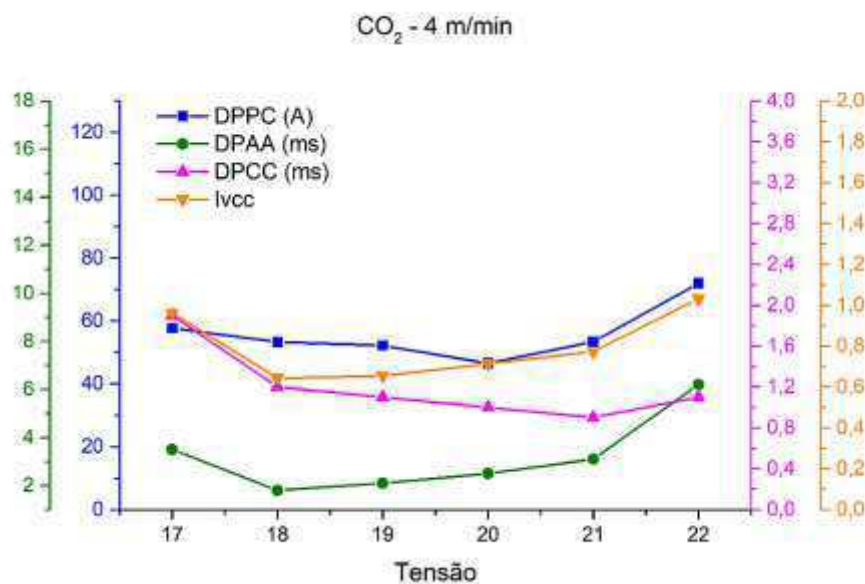


Figura 39 – Índices da estabilidade das soldas com CO₂ e V_{alim} de 4 m/min

- CO₂ - V_{alim} de 5 m/min

A tabela 25 e a figura 40 mostram os índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas que utilizaram CO₂ com a V_{alim} de

5 m/min. A tensão de 18 V apresenta índices de estabilidade elevados. Já com a tensão de 19 V ocorre uma diminuição nos valores dos índices, sendo que as tensões de 19, 20 e 21 V apresentam os menores valores para os índices. A partir da tensão de 22 V os valores dos índices voltam atingir um patamar superior, sendo que as tensões de 22 e 23 V apresentam valores mais elevados para os índices de estabilidade. A faixa operacional, com base nos índices de estabilidade foi definida como sendo de 19 a 21 V.

Tabela 25 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com CO₂ e V_{alim} de 5 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	I _m (A)	DPPC (ms)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	I _{vcc}
CO ₂	5	18	214,9	73,5	2,5	2,1	0,895
		19	209,3	68,9	2,2	1,5	0,723
		20	204,2	60,7	2,2	1,3	0,764
		21	202,6	65,8	2,4	1,2	0,741
		22	204,5	68,2	3,8	1,0	0,968
		23	199,5	100,1	7,3	1,2	1,291

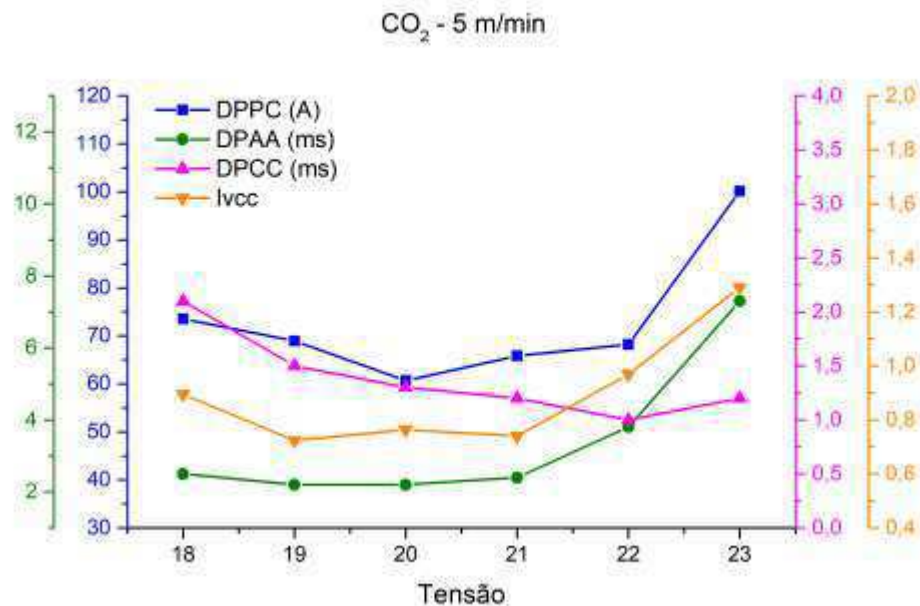


Figura 40 – Índices da estabilidade das soldas com CO₂ e V_{alim} de 5 m/min

- CO₂+1,3%C₃H₆ - V_{alim} de 4 m/min

A tabela 26 e a figura 41 mostram os índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas que utilizaram CO₂+1,3%C₃H₆ com

a V_{alim} de 4 m/min. A tensão de 17 V apresenta índices com valores elevados dos índices de estabilidade. Com a tensão de 18 V ocorre uma queda brusca dos valores dos índices de estabilidade. A faixa de tensão de 18 a 21 V possui os menores valores para os índices de estabilidade. Com a tensão de 22 V ocorre um aumento brusco dos valores dos índices de estabilidade, evidenciando que um aumento na instabilidade do processo. A faixa operacional foi definida como sendo de 18 a 21 V, o que está de acordo com o que foi visto durante a análise qualitativa.

Tabela 26 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com $CO_2+1,3\%C_3H_6$ e V_{alim} de 4 m/min

Gás	V_{alim} (m/min)	U (V)	I_m (A)	DPPC (ms)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	I_{vcc}
$CO_2+1,3\%C_3H_6$	4	17	173,7	66,2	9,3	3,4	1,898
		18	173,0	54,5	2,6	1,3	0,836
		19	171,1	48,0	2,0	0,9	0,668
		20	169,6	43,0	2,5	0,7	0,665
		21	169,6	41,9	2,4	0,7	0,643
		22	164,9	77,7	6,6	1,1	1,052
		23	159,9	110,8	11,8	1,4	1,236

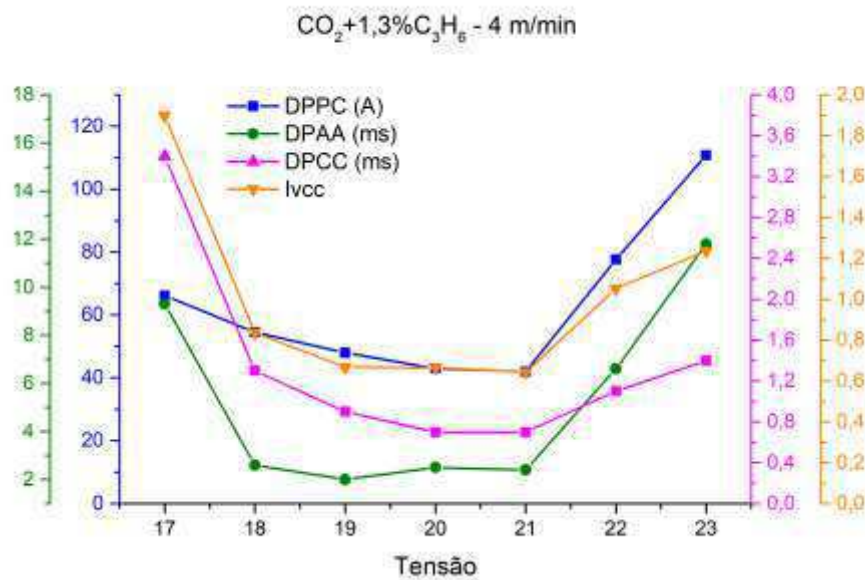


Figura 41 – Índices da estabilidade das soldas com $CO_2+1,3\%C_3H_6$ e V_{alim} de 4 m/min

- $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ - V_{alim} de 5 m/min

A tabela 27 e a figura 42 mostram os índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas que utilizaram $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ com a V_{alim} de 5 m/min. Os valores indicados na tabela 27 foram plotados em um gráfico que mostra a variação dos índices de estabilidade de acordo com a tensão aplicada, como mostra a figura 41. Com a tensão de 18 V os valores dos índices estão elevados. Já com a tensão de 19 V ocorre uma queda nos valores dos índices de estabilidade. Entre 19 a 22 V os índices de estabilidade apresentam os menores valores. Com a tensão para 23 V, ocorre uma elevação nos índices de estabilidade do processo, sendo este um indicativo de aumento da instabilidade do processo. A faixa operacional indicada para o processo é de 19 a 22 V.

Tabela 27 – Índices de estabilidade calculados a partir dos sinais elétricos gerados pelas soldas com $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 5m/min

Gás	V_{alim} (m/min)	U (V)	I_m (A)	DPPC (ms)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	I_{vcc}
CO2 +1,3%C3H6	5	18	180,4	63,7	12,0	4,9	1,774
		19	198,7	62,5	2,7	1,7	0,736
		20	198,8	62,5	2,8	1,6	0,762
		21	202,7	65,5	3,0	1,5	0,870
		22	199,4	61,2	3,7	1,0	0,866
		23	194,8	92,8	8,1	1,3	1,194

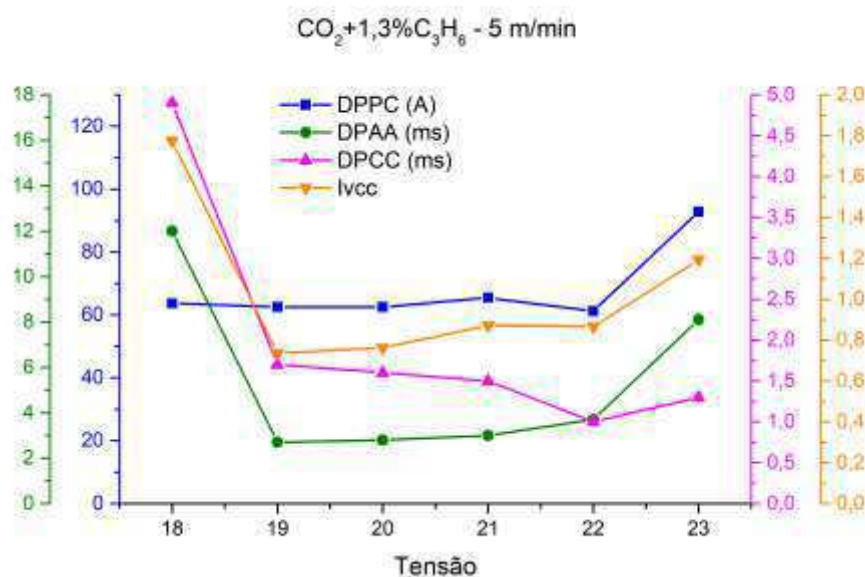


Figura 42 – Índices da estabilidade das soldas com $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 5 m/min

4.1.3.1. Determinação das faixas operacionais

A partir da análise dos sinais elétricos, e dos índices de estabilidade correspondentes, foi possível determinar as faixas operacionais em que o processo apresenta a estabilidade mais adequada, para cada um dos gases utilizados. A tabela 28 mostra as faixas de tensão definidas com base nos índices de estabilidade.

Tabela 28 - Faixas de tensão definidas com base na análise dos sinais elétricos

Gás	V_{alim} (m/min)	Faixa operacional (V)
Ar+25%CO ₂	4	15-17
	5	15-18
CO ₂	4	18-21
	5	19-21
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	4	15-18
	5	17-19
CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆	4	18-21
	5	19-22

Analisando a Tabela 28 é possível fazer as seguintes observações:

- As faixas operacionais apresentadas na tabela 28 estão de acordo com o observado durante a avaliação qualitativa dos cordões de solda e com as faixas de tensão mostradas na tabela 19. Estes intervalos de tensão foram os que demonstraram o melhor desempenho operacional durante a soldagem, com baixa geração de respingos e ruído uniforme. Sendo assim, estas podem ser consideradas as faixas de tensão adequadas para a soldagem;
- A adição de 0,6% de C₃H₆ à mistura de Ar+25%CO₂ resultou no deslocamento da faixa operacional de 15 a 17 V para 17 a 19 V na velocidade de 5 m/min, não sendo possível depositar cordões de solda com tensão inferior a 17 V devido a elevada instabilidade;

- A adição de C_3H_6 à mistura de $Ar+25\%CO_2$ alterou o comportamento geral do processo, com uma elevação dos valores dos índices de estabilidade dentro da faixa operacional do processo;
- A adição de 1,3% de C_3H_6 ao CO_2 puro não provocou nenhuma alteração nas faixas operacionais do processo, no entanto houve um aumento da instabilidade em tensões fora da faixa operacional do processo;
- Foi possível observar que os gases com maior concentração de CO_2 apresentaram faixas operacionais com valores de tensão mais elevados. Como mostra Keocheguerians, et al. (2011), o incremento na concentração de CO_2 leva a um aumento na instabilidade do processo, sendo necessário um aumento da tensão para se atingir uma estabilidade adequada;

4.1.4. Determinação dos parâmetros para a Etapa II

Para a Etapa II, foram determinados valores de tensão de trabalho. Os valores de tensão foram escolhidos com base nas tabelas 19 e 25, que mostram respectivamente as faixas operacionais determinadas com base nas análises qualitativa e quantitativa respectivamente. Os valores de tensão aplicados foram aqueles que se encontravam no meio das faixas operacionais do processo para cada gás de proteção e valor de V_{alim} utilizados. Esta decisão foi tomada pela possibilidade das juntas afetarem a estabilidade do processo, podendo deslocar os valores das extremidades para fora da faixa operacional. A tabela 25 mostra os valores de tensão definidos para a soldagem dos corpos de prova.

Tabela 29 – Valores de tensão selecionados para a soldagem dos corpos de prova

Gás	V_{alim} (m/min)	Tensão (V)
Ar+25% CO_2	4	16
	5	16
CO_2	4	20
	5	20
Ar+25% CO_2 +0,6% C_3H_6	4	16
	5	18
CO_2 +1,3% C_3H_6	4	20
	5	20

4.1.5. Considerações sobre a Etapa I

Os parâmetros utilizados foram adequados para o processo de soldagem, sendo possível determinar faixas de tensão onde o arco elétrico apresentava adequada estabilidade, gerando cordões de solda de bom aspecto, com baixa geração de respingos e ruídos, para todos os gases de proteção e para os dois valores de V_{alim} utilizados.

As análises, qualitativa dos cordões de solda e do processo de soldagem, e quantitativa dos sinais elétricos, possibilitaram a determinação das faixas operacionais em que a estabilidade do arco elétrico foi considerada a mais adequada.

A variação da tensão provocou efeitos típicos sobre os cordões de solda, com os mesmos se tornando mais largos e baixos conforme a tensão aumentava, o que está de acordo com o trabalho de Fischer (2011). Também foi possível observar que tensões fora da faixa operacional dos gases de proteção provocam um aumento na instabilidade do arco elétrico, além de uma maior geração de respingos durante a soldagem, comportamento semelhante ao apresentado por Souza, *et al.* (2011) em seu trabalho.

A adição de C_3H_6 não provocou alterações severas no comportamento operacional das soldagens, com exceção da adição de 0,6% de C_3H_6 à mistura de $Ar+25\%CO_2$ que provocou um deslocamento de 2 V na faixa operacional do processo na V_{alim} de 5 m/min.

Os índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IV_{cc} se mostraram adequados para a determinação da estabilidade do processo, uma vez que esses índices corroboraram com os resultados da avaliação qualitativa dos cordões de solda.

4.2. Etapa II

4.2.1. Soldagem das chapas

As chapas foram preparadas para a utilização de junta de topo com chanfro em V e junta de ângulo em T como mostra a figura 43. Foram realizados pontos de solda nas extremidades das juntas para evitar a possível ocorrência de

desalinhamentos durante a soldagem. As soldas foram realizadas com um único passe, sem preenchimento total das juntas.

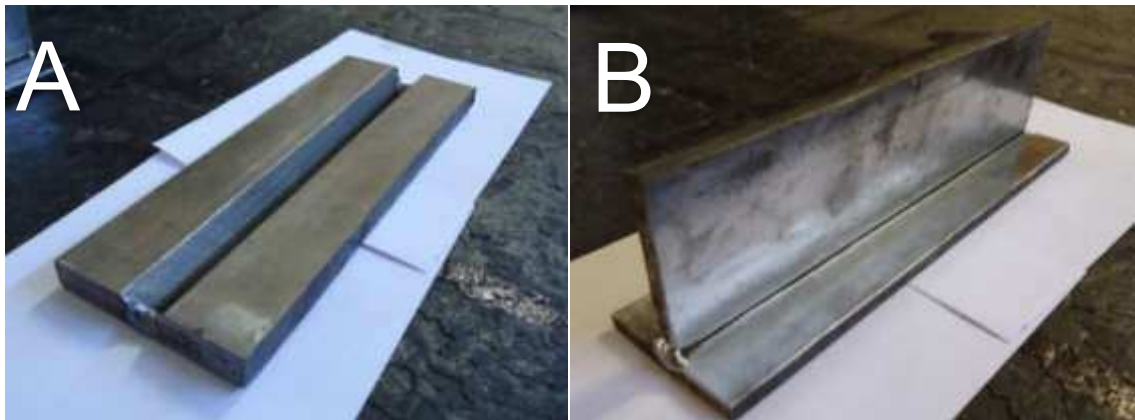


Figura 43 – Corpos de prova preparados com A) junta de topo em V e B) junta de ângulo em T

Antes da realização das soldas, o coletor de respingos e a tocha receberam uma camada de anti-respingo, para facilitar a remoção dos respingos que ficaram aderidos. Os parâmetros fixos de soldagem são mostrados na tabela 8, e a tensão de trabalho e os valores de V_{alim} foram definidos na etapa I. A tabela 30 mostra a matriz de experimentos da etapa II.

Tabela 30 – Matriz de experimentos para a segunda a Etapa II

Corpo de prova	Gás	V_{alim} (m/min)	Tipo de Junta	Tensão de trabalho (V)	
AR4V	Ar+25%CO ₂	4	V	16	
AR5V		5	V	16	
AR4T		4	T	16	
AR5T		5	T	16	
AP4V		4	V	16	
AP5V	Ar+25%CO ₂ + 0,6%C ₃ H ₆	5	V	18	
AP4T		4	T	16	
AP5T		5	T	18	
CO4V		CO ₂	4	V	20
CO5V			5	V	20
CO4T	4		T	20	
CO5T	5		T	20	
CP4V	CO ₂ + 1,3%C ₃ H ₆		4	V	20
CP5V		5	V	20	
CP4T		4	T	20	
CP5T		5	T	20	

Para a identificação dos corpos de prova foi definido o sistema de nomenclatura mostrado na tabela 30, onde os dois primeiros caracteres fazem referência ao tipo de gás utilizado (AR – Ar+25%CO₂, AP – Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, CO – CO₂, CP – CO₂+1,3%C₃H₆), o terceiro se refere ao valor de Valim utilizado (4 e 5 m/min) e o quarto define o tipo de junta utilizado (V – Junta de topo com chanfro em V, T – Junta de ângulo em T)

4.2.2. Análise qualitativa

Após a soldagem das chapas, os cordões de solda foram limpos com o auxílio de uma escova de aço rotativa, para a realização da inspeção visual, e por fim foram submetidos ao ensaio de líquido penetrante. As soldas foram fotografadas após realização dos ensaios não destrutivos, sendo os resultados obtidos detalhados a seguir:





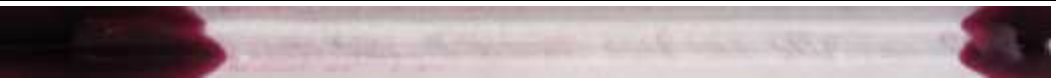


- Ar+25%CO₂

A tabela 31 mostra as imagens relativas aos ensaios de IV e LP, respectivamente, realizados nas soldas produzidas com Ar+25%CO₂. De modo geral, os cordões de solda apresentaram uniformidade e bom acabamento, sem qualquer tipo de descontinuidade visível a olho nu.

O ensaio de LP apontou descontinuidades na lateral do cordão de solda do corpo de prova AR5V, tendo sido atribuídas a um pequeno desalinhamento entre a tocha de soldagem e o chanfro. As descontinuidades não foram consideradas um agravante e não afetaram os resultados das análises, não tendo sido necessária a produção de uma nova solda. Também foram apontados indícios de descontinuidades nas extremidades dos corpos de prova AR4T e AR5T, que apresentaram manchas de grande dimensão. No entanto, como mencionado nos materiais e métodos, durante o ensaio de LP as extremidades das soldas não foram consideradas.

As quantidades de escória e respingos produzidos durante a soldagem foram relativamente baixas para ambos os valores de V_{alim} e para os dois tipos de juntas utilizadas. Este comportamento evidenciou que a utilização de juntas não afetou a estabilidade do processo.

Tabela 31 - Inspeção Visual e Líquido Penetrante das soldas com Ar+25%CO₂

Juntas de Topo com chanfro em V	
CP	Imagem
AR4V	
	
AR5V	
	
Juntas de ângulo em T	
CP	Imagem
AR4T	
	
AR5T	
	


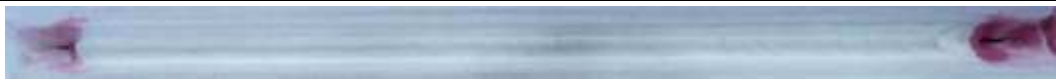


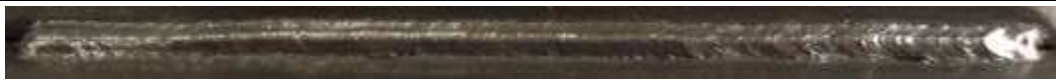
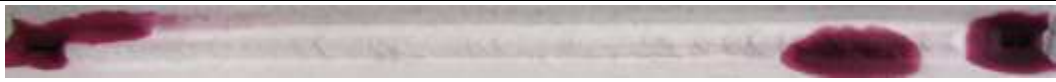


- Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

A tabela 32 mostra as imagens relativas aos ensaios de IV e LP realizados nos corpos de prova soldados com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆. Os cordões de solda apresentarem bom acabamento e uniformidade. O ensaio de IV e LP indicaram a presença de descontinuidades nas extremidades dos cordões de solda AP4T e AP5T, que não foram consideradas. Além das extremidades, o cordão de solda AP4T também apresentou presença de descontinuidades próximas a uma de suas extremidades, atribuídas a um pequeno desalinhamento em relação as chapas que formam a junta.

Ainda com relação as soldas, foi possível perceber as quantidades de respingos e escória foram relativamente baixas, o que mostra que a estabilidade não foi afetada pela utilização de juntas.

Ao se comparar os resultados obtidos pelas soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ com aquelas que utilizaram $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, não foi possível perceber alterações significativas causadas pela adição de C_3H_6 . As quantidades de escória e respingos gerados pelas soldas foram visualmente as mesmas para os dois gases. Também não foi possível perceber mudanças no formato e aparência dos cordões de solda. De maneira geral, a adição de C_3H_6 não afetou a estabilidade do processo, sendo possível produzir soldas para ambos os tipos de junta e valores de V_{alim} utilizados.

Tabela 32 - Inspeção Visual e Líquido Penetrante das soldas com CO_2

Juntas de Topo com chanfro em V	
CP	Imagem
AP4V	
	
AP5V	
	
Juntas de ângulo em T	
CP	Imagem
AP4T	
	
AP5T	
	


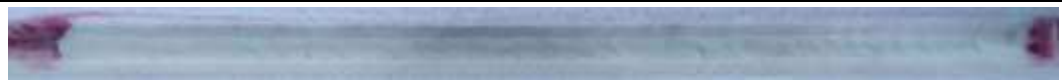






- CO_2

A tabela 33 mostra as imagens relativas aos ensaios de IV e LP realizados nos corpos de prova soldados com CO_2 . Os cordões de solda se apresentaram uniformes com bom aspecto visual. Após a limpeza ficou evidente a presença de

uma quantidade considerável de respingos retidos, principalmente ao longo das linhas laterais dos cordões de solda. O ensaio de LP apontou indícios de descontinuidades somente nas extremidades das soldas CO4T e CO5T, mas de acordo com o critério determinado, não foram consideradas.

As quantidades de respingos e escoria produzidas pelas soldas foram, visualmente, próximas, o que indica que a utilização de juntas não afetou a estabilidade do processo.

Tabela 33 - Inspeção Visual e Líquido Penetrante das soldas com CO₂

Juntas de Topo com chanfro em V	
CP	Imagem
CO4V	
	
CO5V	
	
Juntas de ângulo em T	
CP	Imagem
CO4T	
	
CO5T	
	

- CO₂+1,3%C₃H₆

A tabela 34 mostra as imagens relativas aos ensaios de IV e LP realizados nos corpos de prova soldados com CO₂+1,3%C₃H₆. De maneira geral, todos os cordões de solda apresentaram boa aparência e uniformidade. O ensaio de LP não identificou a presença de descontinuidades ao longo dos cordões de solda. Foram observadas descontinuidades somente nas extremidades das soldas CP4T

e CP5T, que foram desconsideradas, de acordo com o critério adotado. Não foram percebidas diferenças significativas entre as soldas produzidas com os dois tipos de juntas, indicando uma relativa estabilidade do processo de soldagem com base nos parâmetros utilizados.

Não foi possível perceber alterações significativas causadas pela adição de C_3H_6 ao CO_2 . Os cordões de solda apresentaram aparências e formatos semelhantes. Também não foram percebidas alterações nas quantidades de escória e respingos produzidas. Para ambos os gases, foi possível produzir soldas de qualidade, não sendo perceptível alterações na estabilidade do processo. De modo geral, a adição de C_3H_6 ao CO_2 não se mostrou prejudicial ao processo.

Tabela 34 - Inspeção Visual e Líquido Penetrante das soldas com $CO_2+1,3\%C_3H_6$

Juntas de Topo com chanfro em V	
CP	Imagem
CP4V	
	
CP5V	
	
Juntas de ângulo em T	
CP4T	
	
CP5T	
	

4.2.2.1. Avaliação da análise qualitativa

A partir dos resultados obtidos é possível fazer as seguintes observações:

- Os cordões de solda produzidos apresentaram um bom comportamento operacional, com uma geração de respingos e escória relativamente baixa, e uma produção de ruídos uniforme. Este comportamento era esperado, já que os parâmetros utilizados durante a soldagem das chapas foram aqueles considerados mais adequados após as análises realizadas na Etapa I;
- Como já era esperado, as soldas produzidas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ apresentaram menores quantidades de escória e respingos gerados se comparadas as soldas realizadas com CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$. Este comportamento também foi observado por Santos (2018), que relatou que os gases com maior concentração de CO_2 produziram respingos e escória em maior quantidade;
- De modo geral, a adição de C_3H_6 ao $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e CO_2 não produziu alterações significativas com relação à aparência e formato do cordão de solda. A estabilidade do processo somente foi alterada de forma significativa para a adição de C_3H_6 ao $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ na V_{alim} de 5 m/min, onde foi necessária uma maior tensão para se atingir um nível adequado de estabilidade;
- Em comparação com as soldas do tipo cordão sobre a chapa, realizadas na etapa I, o comportamento operacional exibido pelas soldas na etapa II não foi afetado significativamente pela utilização das juntas. De modo geral, a estabilidade apresentada pelas soldas realizadas na etapa II foi considerada adequada, além de estar relativamente próxima da estabilidade apresentada pelas soldas da etapa I;

4.2.3. Análise da estabilidade do processo

Os sinais elétricos foram captados durante a soldagem, e assim como na etapa I, foram calculados os índices de estabilidade. A tabela 35 mostra valores dos índices de estabilidade calculados (DPPC, DPAA, DPCC, IV_{cc}). Os índices de estabilidade obtidos foram avaliados primeiramente realizando uma

comparação entre os gases convencionais em relação aos gases com adição de C_3H_6 , e posteriormente comparando os resultados obtidos na etapa II com os da etapa I.

4.2.3.1. Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

- V_{alim} de 4 m/min

A tabela 35 e a figura 44 mostram a variação dos valores dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min. As soldas realizadas apresentaram valores relativamente próximos para os índices de estabilidade.

Com relação ao Ar+25%CO₂, é possível perceber que a junta em ângulo apresenta menores valores para os índices de estabilidade do que a juntas de topo. Nesse caso, a estabilidade apresentada pelas soldas com junta em ângulo é relativamente maior, porém a diferença não foi grande o suficiente para causar alterações significativas.

Já com o Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, não foram perceptíveis diferenças significativas nos valores dos índices estabilidade entre as soldas com juntas de topo em relação as soldas com juntas de ângulo.

A adição de C_3H_6 ao Ar+25%CO₂ não provocou alterações significativas nos valores dos índices de estabilidade das soldas com junta de topo, sendo que AR4V e AP4V apresentam valores bem próximos.

Com relação as juntas em ângulo, AP4T apresentou um ligeiro aumento dos valores dos índices de estabilidade se comparada a AR4T, indicando que a adição de C_3H_6 levou a uma redução da estabilidade, mas que não foi significativa para o processo como um todo.

Ribeiro (2016), em seu trabalho, observou que a adição de C_3H_6 ao Ar+25%CO₂ na V_{alim} de 4 m/min, de modo geral, resultou em uma leve diminuição dos valores dos índices de estabilidade, resultando em maior regularidade na transferência metálica, e por consequência em maior estabilidade do processo. Nesse caso, os resultados apresentados por Ribeiro se contrapõem aos obtidos neste trabalho, já que a adição de C_3H_6 não resultou em diminuição dos valores dos índices de estabilidade. No entanto, vale ressaltar que Ribeiro utilizou

parâmetros diferentes dos aqui utilizados, realizando soldas do tipo cordão sobre a chapa e tensão de 17 V, o que pode ter tido influência sobre os resultados apresentados.

Tabela 35 – Índices de estabilidades das soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min

CP	U (V)	U _m (V)	I _m (A)	DPPC (A)	t _{aa} (ms)	DPAA (ms)	t _{cc} (ms)	DPCC (ms)	IVCC
AR4V	16	16,4	194,4	34,8	8,2	2,4	2,6	0,8	0,600
AR4T	16	16,4	191,6	28,7	7,5	1,7	2,5	0,6	0,467
AP4V	16	16,9	188,8	34,6	8,3	2,4	2,4	0,7	0,581
AP4T	16	16,9	188,7	36,6	8,3	2,6	2,5	0,7	0,593

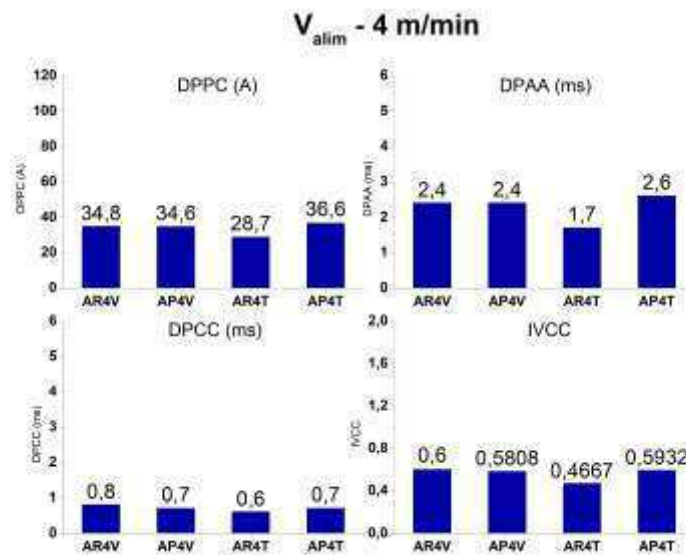


Figura 44 – Índices de estabilidade soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min

- V_{alim} de 5 m/min

A tabela 36 e a figura 45 mostram a variação dos valores dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ e V_{alim} de 5 m/min. As soldas realizadas com Ar+25%CO₂, apresentaram valores similares para os índices de estabilidade tanto com junta de topo quanto com junta de ângulo.

Quando foi utilizado o Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, a junta em ângulo, apresentou menores valores para os índices de estabilidade se comparada a

junta de topo. No entanto a estabilidade das soldas não foi afetada de forma significativa.

A adição de C_3H_6 resultou em uma diminuição dos valores dos índices de estabilidade para ambas as juntas. Com relação as soldas com junta de topo, percebe-se que AP5V apresenta valores pouco menores para os índices de estabilidade se comparado a AR5V, indicando uma pequena melhora na estabilidade do processo.

A adição de C_3H_6 produziu um efeito mais pronunciado sobre as soldas com junta em ângulo, sendo que AP5T apresentou, de maneira geral, menores valores para os índices de estabilidade em relação a AR5T, com exceção do DPAA. Neste caso a adição de C_3H_6 resultou em um aumento mais expressivo da estabilidade do processo das soldas que utilizaram juntas de angulo.

É necessário ressaltar que, como foi visto na etapa I, a estabilidade do processo na V_{alim} de 5 m/min foi afetada após a adição de C_3H_6 , sendo necessário um reajuste dos parâmetros para se alcançar uma adequada estabilidade. Por isso, as soldas produzidas com $Ar+25\%CO_2$ utilizaram tensão de 16 V, enquanto foi utilizada uma tensão de 18 V com $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$.

Ribeiro (2016), em seu trabalho, relatou que na V_{alim} de 5 m/min a adição de C_3H_6 exibia pouca influência sobre a estabilidade do processo, sem provocar alterações significativas. Já Polonine (2018), observou que a adição de C_3H_6 resultou em pequena elevação dos valores dos índices de estabilidade. Os resultados obtidos por ambos os autores diferem daqueles apresentados neste trabalho. No entanto, vale ressaltar que tanto Ribeiro quanto Polonine realizaram soldas do tipo cordão sobre a chapa. Além e utilizar parâmetros ligeiramente diferentes dos aplicados neste trabalho, com uma tensão de 23 V utilizada por Ribeiro, e 19V por Polonine.

Tabela 36 – Índices de estabilidades das soldas com $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$ e V_{alim} de 5 m/min

CP	U (V)	U_m (V)	I_m (A)	DPCC (A)	t_{aa} (ms)	DPAA (ms)	t_{cc} (ms)	DPCC (ms)	IVCC
AR5V	16	15,8	225,4	44,1	8,7	2,7	3,5	1,3	0,682
AR5T	16	15,9	225	50,3	8,1	1,7	3,4	1,4	0,622
AP5V	18	17,7	226,5	41,7	9,4	2,5	2,7	0,9	0,599
AP5T	18	18	219,4	34,6	9,4	2,1	2,5	0,6	0,463

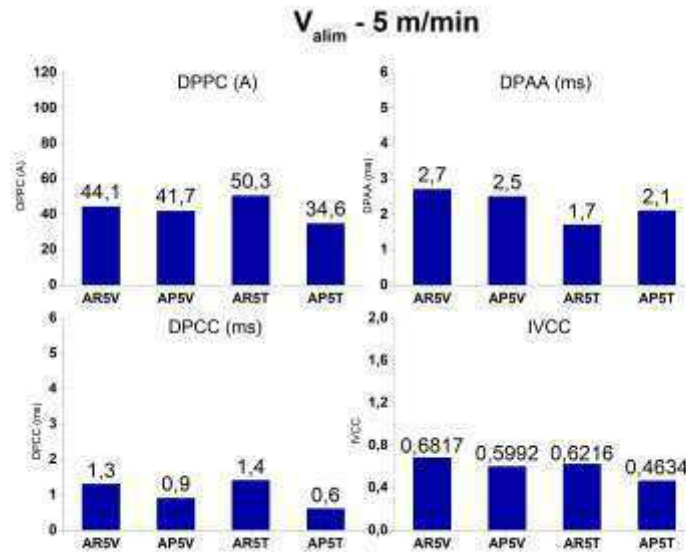


Figura 45 – Índices de estabilidade das soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 4 m/min

- Comparação entre 4 m/min e 5 m/min

No caso do $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, ao se fazer um paralelo entre as soldas realizadas com V_{alim} de 4 m/min e de 5 m/min, é possível perceber que o aumento da V_{alim} resulta em maiores valores para os índices de estabilidade.

Já com relação ao $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$, o aumento da V_{alim} não altera de forma significativa os valores dos índices de estabilidade, que se mantêm relativamente próximos. Este comportamento foi atribuído a adição de C_3H_6 , que afetou a estabilidade do processo. Nesse caso, a estabilidade do $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ se encontra em um valor de tensão mais elevado.

A adição de C_3H_6 , na V_{alim} de 4 m/min, não melhorou a estabilidade do processo, sendo que as soldas que utilizaram $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ e juntas em ângulo apresentaram um ligeiro aumento dos valores dos índices de estabilidade. Já na V_{alim} de 5 m/min, foi observado que a adição de C_3H_6 resultou em uma significativa redução dos valores dos índices de estabilidade.

De maneira geral, a adição de C_3H_6 ao $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ se mostrou mais benéfica para maiores valores de V_{alim} , como a de 5 m/min, onde pode-se perceber a ocorrência de uma maior estabilidade. Para menores valores de V_{alim} ,

como o caso de 4 m/min, a adição de C₃H₆ ou não provoca alterações significativas ou gera uma tendência em diminuir a estabilidade do processo.

4.2.3.2. CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆

- V_{alim} de 4 m/min

A tabela 37 e a figura 46 mostram a variação dos valores dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min. Não houve grandes variações nos valores dos índices de estabilidade em relação aos dois tipos de junta utilizados, tanto para o CO₂ quanto para o CO₂+1,3%C₃H₆.

A adição de C₃H₆ não provocou alterações significativas na estabilidade do processo, sendo que os índices de estabilidade apresentados pelas soldas foram relativamente próximos.

Os resultados estão de acordo com o trabalho de Ribeiro (2016), que mostrou que a adição de C₃H₆ ao CO₂ não provocou alterações significativas na estabilidade do processo. Os índices de estabilidade se mantiveram próximos para todas as soldas, e a estabilidade, de forma geral, não mostrou alterações significativas.

Tabela 37 – Índices de estabilidades das soldas com CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆ e V_{alim} de 4 m/min

CP	U (V)	U _m (V)	I _m (A)	DPPC (A)	t _{aa} (ms)	DPAA (ms)	t _{cc} (ms)	DPCC (ms)	IVCC
CO4V	20	20,5	180,9	55,8	8	3,5	1,9	0,8	0,859
CO4T	20	20,9	154,3	59,9	9,8	5	2	0,8	0,910
CP4V	20	20,8	175,5	52	8,7	3,5	2,1	0,8	0,783
CP4T	20	20,7	176,8	58,5	8,4	3,6	2,2	1	0,883

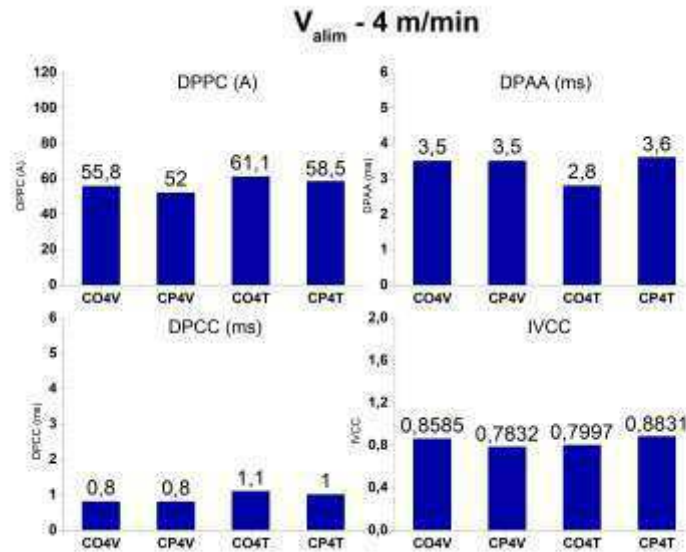


Figura 46 – Índices de estabilidade das soldas com CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 4 m/min

- V_{alim} de 5 m/min

A tabela 38 e a figura 47 mostram a variação dos valores dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ e V_{alim} de 5 m/min. As juntas em ângulo apresentaram, tanto para o CO_2 quanto para o $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$, valores mais elevados para os índices de estabilidade em relação as juntas de topo. No entanto não foi perceptível alterações significativas com relação a estabilidade do processo.

A adição de C_3H_6 não resultou em significativa alteração da estabilidade, sendo que os valores dos índices de estabilidade se mantiveram relativamente próximos para ambas as juntas.

Os resultados estão de acordo com Polonine (2018), que relatou que a adição de C_3H_6 ao CO_2 não provocou alterações significativas nos valores dos índices de estabilidade na V_{alim} de 5 m/min.

De modo geral, a adição de C_3H_6 ao CO_2 não afetou de forma significativa a estabilidade do processo. Sendo que os resultados obtidos estão de acordo com o que foi visto na análise qualitativa.

Tabela 38 – Índices de estabilidades das soldas com CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆ e V_{alim} de 5 m/min

CP	U (V)	U _m (V)	I _m (A)	DPPC (A)	t _{aa} (ms)	DPAA (ms)	t _{cc} (ms)	DPCC (ms)	IVCC
CO5V	20	19,7	218,4	75,1	8,9	4	2,9	1,6	1,001
CO5T	20	19,7	214,6	81,7	10,2	4,5	3,2	1,8	1,004
CP5V	20	20,1	211,1	71,5	9,3	4	2,8	1,3	0,894
CP5T	20	20	213,4	80,5	9,7	4,6	3,1	1,8	1,055

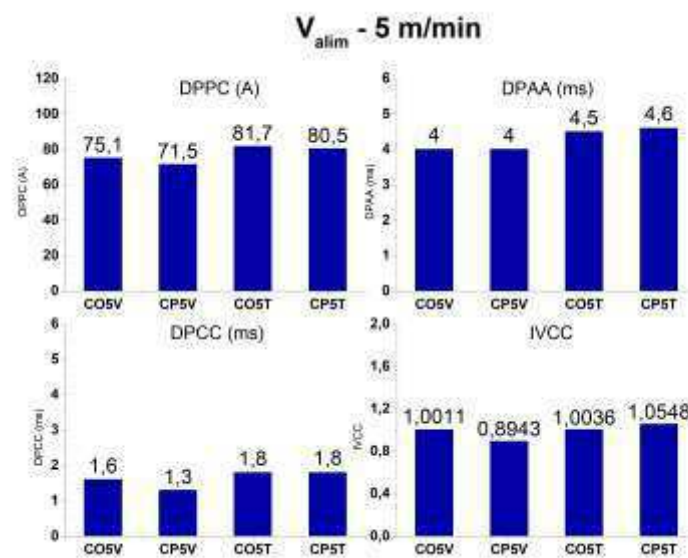


Figura 47 – Índices de estabilidade dos corpos de prova soldados com CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆ e V_{alim} de 5 m/min

- Comparação entre V_{alim} de 4 m/min e 5 m/min

Ao se comparar os resultados obtidos para ambos os valores de V_{alim}, é possível observar que o comportamento geral apresentado pelas soldas é praticamente o mesmo, com os valores dos índices de estabilidade apresentando pouca variação.

A V_{alim} de 4 m/min apresentou menores valores para os índices de estabilidade, se comparado a V_{alim} de 5 m/min.

A adição de C_3H_6 não resultou em alterações significativas dos índices de estabilidade, com todas as soldas apresentando uma relativa qualidade, ou seja, a estabilidade apresentada pelo processo não foi afetada do ponto de vista dos sinais elétricos. Neste caso, a adição de C_3H_6 não se mostrou nem benéfica nem maléfica para a estabilidade do processo.

4.2.3.3. Análise geral da estabilidade do processo

A análise dos resultados mostra que não houve diferenças significativas de estabilidade entre os dois tipos de juntas utilizados. Os valores apresentados pelos índices de estabilidade para os dois tipos de juntas, foram relativamente próximos para todos os gases e valores de V_{alim} utilizados. Este comportamento indica que é possível realizar soldas com juntas de topo e juntas de ângulo com relativa qualidade e que apresentem uma estabilidade adequada.

A adição de C_3H_6 não alterou de forma significativa a estabilidade do processo. Os valores dos índices de estabilidade apresentados pelas soldas realizadas com os gases convencionais foram relativamente próximos aos apresentados pelas soldas que utilizaram gases com adição de C_3H_6 .

O $Ar+25\%CO_2$ se mostrou mais sensível à adição de C_3H_6 , que resultou em diminuição dos valores dos índices de estabilidade na V_{alim} de 5 m/min.

Já a adição de C_3H_6 ao CO_2 não resultou em alterações significativas nos valores dos índices de estabilidade. As soldas realizadas mostraram uma estabilidade adequada, não sendo notadas quaisquer alterações significativas.

Os índices de estabilidade, tanto para os gases convencionais quanto para os gases com adição de C_3H_6 se mantiveram dentro da faixa operacional do processo definida na etapa I, em que a estabilidade foi considerada a mais adequada. Este é um indicativo de que é possível obter soldas com uma estabilidade adequada utilizando gases com adição de C_3H_6 .

Os resultados da análise da estabilidade do processo estão de acordo com os resultados da análise qualitativa realizada na etapa I, em que todos os cordões de solda apresentaram bom acabamento e bom desempenho operacional.

De modo geral, é possível realizar soldas com qualidade e estabilidade adequadas em juntas de topo com chanfro em V e juntas de ângulo em T utilizando gases com adição de C_3H_6 .

- Comparação com a etapa I

Os resultados obtidos para os índices de estabilidade das soldas em juntas realizadas na etapa II foram comparados com os resultados obtidos para as soldas em chapas na etapa I.

A figura 48 mostra a variação dos índices de estabilidade do processo obtidos para as soldas realizadas com V_{alim} de 4 m/min nas etapas I e II.

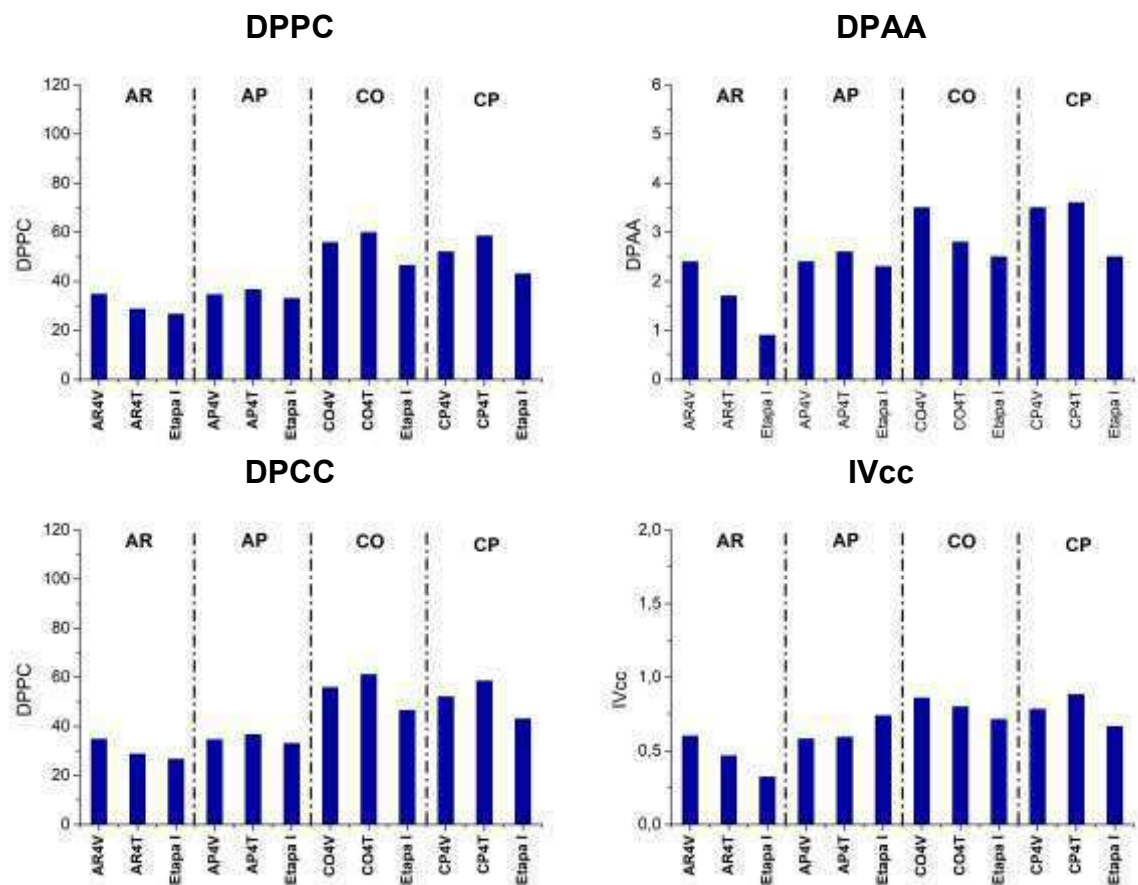


Figura 48 – Índices de estabilidade das soldas realizadas nas etapas I e II com V_{alim} de 4 m/min

A partir da análise da figura 48 é possível observar que na V_{alim} de 4 m/min:

- A utilização de juntas levou a uma diminuição da estabilidade das soldas realizadas com CO_2 e $CO_2+1,3\%C_3H_6$, que apresentaram um aumento dos valores dos índices de estabilidade.
- As soldas realizadas com $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$ apresentaram na etapa II valores para os índices de estabilidade próximos aos da etapa I. Já as

soldas realizadas com Ar+25%CO₂ mostraram que a utilização de juntas levou a um aumento dos valores dos índices de estabilidade.

A figura 49 mostra a variação dos índices de estabilidade do processo obtidos para as soldas realizadas com V_{alim} de 5 m/min nas etapas I e II.

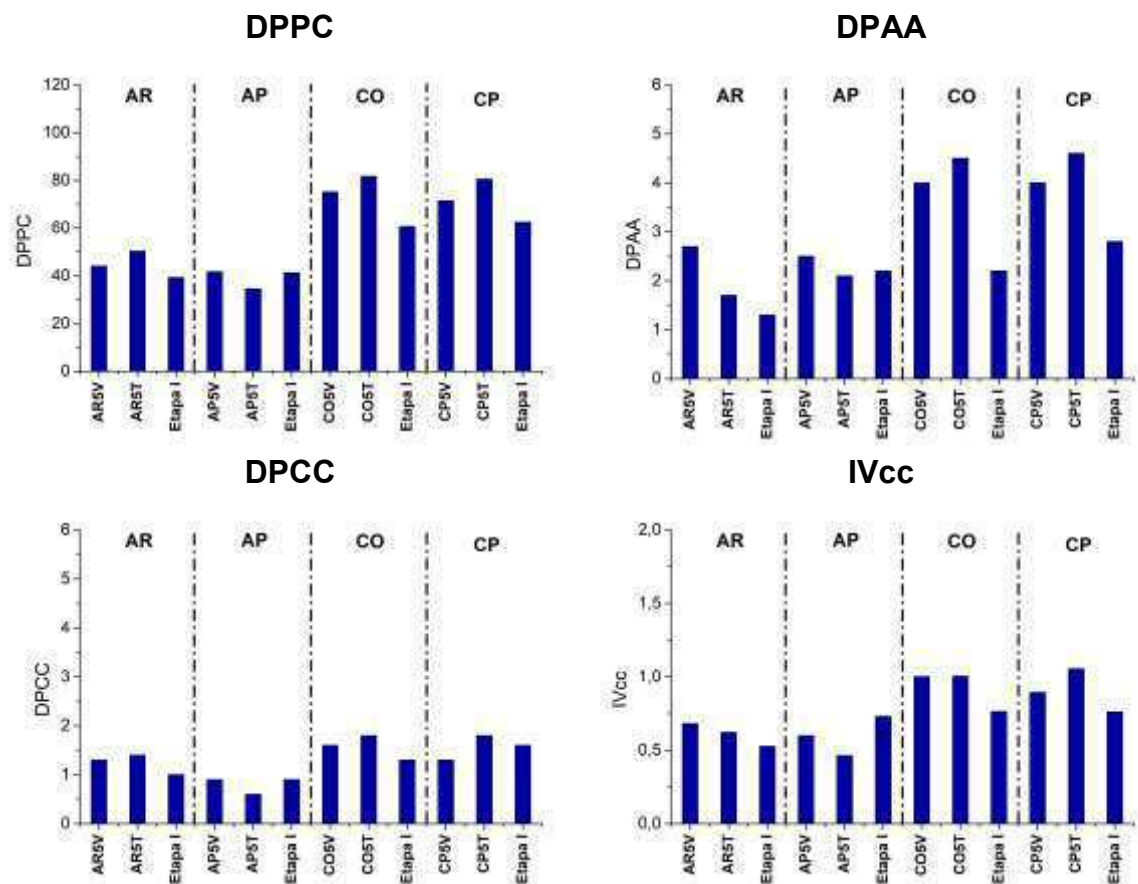


Figura 49 – Índices de estabilidade das soldas realizadas nas etapas I e II com V_{alim} de 5 m/min

A partir da análise da figura 49 é possível observar que na V_{alim} de 5 m/min:

- As soldas realizadas com CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆ utilizando juntas apresentaram uma redução na estabilidade, com maiores valores para os índices de estabilidade em relação com a solda sobre a chapa da etapa I.
- As soldas realizadas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ apresentaram valores dos índices de estabilidade próximos aos da etapa I.

Nesse caso a utilização de juntas não afetou de forma significativa a estabilidade do processo.

As soldas realizadas com CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ apresentaram maior sensibilidade com relação a adoção de juntas, porém a estabilidade ainda se mostrou adequada para a realização das soldas.

Já as soldas realizadas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ apresentaram uma variação mais contida dos índices de estabilidade, que se mantiveram próximos aos índices obtidos na etapa I.

Ao se comparar os resultados obtidos nas análises qualitativa e quantitativa das etapas I e II, é possível observar que, apesar das variações apresentadas pelos valores dos índices de estabilidade, o comportamento geral das soldas foi semelhante. O acabamento das soldas não apresentou diferenças significativas entre as etapas I e II, assim como não foi possível perceber variações nas quantidades de respingos e escória gerados. De forma geral, a estabilidade do processo não foi afetada de maneira significativa pela utilização de juntas.

4.2.4. Taxa de escória e taxa de respingos

A escória e os respingos gerados durante a soldagem dos corpos de prova na etapa II foram coletados com o auxílio de coletor fechado e separadas de acordo com o gás de proteção utilizado. A tabela 39 e a figura 50 mostram as taxas de respingo e escória para os gases de proteção utilizados.

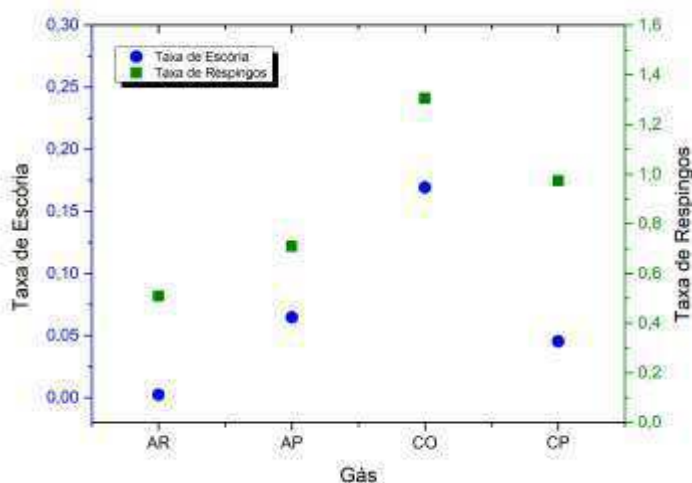


Figura 50 – Taxa de respingos e taxa de escória
 AR – $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, AP – $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$, CO – CO_2 , CP – $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$

Tabela 39 – Taxa de respingos e Taxa de escória

Gás de Proteção	Escória (g)	Respingos (g)	Tempo de soldagem (min)	Taxa de escória (g/min)	Taxa de Respingos (g/min)
Ar+25%CO ₂	0,0054	1,2071	2,37	0,002	0,51
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	0,1589	1,7412	2,46	0,06	0,71
CO ₂	0,4246	3,2724	2,51	0,17	1,30
CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆	0,1120	2,4128	2,48	0,05	0,97

- Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

As soldas realizadas com Ar+25%CO₂ apresentaram as menores quantidades de respingos e escoria. Isto já era esperado, pois o Ar+25%CO₂ possui uma estabilidade adequada para a soldagem, o que resulta em baixa geração de respingos e escoria (Filho, 2014).

Após a adição de C₃H₆ ao Ar+25%CO₂, houve um ligeiro aumento nas quantidades de escória e respingos produzidos, como pode ser visto no gráfico da figura 49, com a taxa de escória aumentando de 0,002 g/min para 0,06 g/min, e a taxa de respingos de 0,51 g/min para 0,71 g/min. No entanto os valores continuaram relativamente baixos, o que indica que a estabilidade não foi afetada de forma significativa.

As quantidades de escória e respingos gerados pelo Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ estão de acordo com o observado durante a análise qualitativa, em que foi possível notar que as mesmas eram nitidamente reduzidas. Os resultados também corroboram com a análise da estabilidade, que mostra que a adição de C₃H₆ não resultou em alterações significativas da estabilidade do processo.

O ligeiro aumento das quantidades de escória e respingos foi atribuído a adição de C₃H₆, que resultou em uma redução do potencial de oxidação do Ar+25%CO₂, que já possui um potencial de oxidação considerado adequado para a realização da soldagem de aço carbono, sendo que um aumento ou diminuição pode resultar em alterações da estabilidade do processo (Groetelaars, 2007).

- CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$

As soldas realizadas com CO_2 apresentaram os maiores níveis de escória e respingos, o que se deve ao seu elevado potencial de oxidação.

A adição do C_3H_6 ao CO_2 resultou em uma redução significativa da taxa de respingos de 1,3 para 0,97 g/min e da taxa de escória de 0,17 para 0,05 g/min. Esta redução foi atribuída à liberação de H_2 durante a dissociação de C_3H_6 . De acordo com Bottin (2000), quando submetidos a elevadas temperaturas, como as do arco elétrico, gases moleculares tendem a se decompor. No caso de um hidrocarboneto, como o C_3H_6 , a decomposição resulta na liberação H_2 , que, de acordo com Tusek e Suban (2000), atua como redutor, reagindo com o O_2 proveniente da dissociação do CO_2 , reduzindo o potencial de oxidação do gás, e conseqüentemente as quantidades de escória e respingos gerados.

Os resultados estão de acordo com a análise qualitativa, em que foi possível perceber que tanto o CO_2 quanto o $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ geraram uma quantidade considerável de respingos e escória. A redução apresentada pelas taxas de respingo e escória em virtude da adição de C_3H_6 também está de acordo com a análise quantitativa das soldas, que mostrou que a estabilidade do processo não foi reduzida após a adição de C_3H_6 .

Os resultados estão de acordo com o observado por Ribeiro (2016) e Polonine (2018) em seus respectivos trabalhos, que perceberam uma redução dos níveis de respingos e escória como consequência da adição de C_3H_6 ao CO_2 .

- Comparação entre os gases

Analisando os resultados obtidos para as taxas de respingos e escória com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ em relação aos gases CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$, é possível observar que os gases com maior concentração de CO_2 produziram maior quantidades de escória e respingos, conseqüentemente apresentando maiores taxas de respingos e escória. Em seu trabalho, Liskevych (2010) analisou a soldagem utilizando desde Ar, passando por misturas de Ar e CO_2 , até chegar ao CO_2 puro, e constatou que a quantidade de respingos e escória gerados cresce exponencialmente com o aumento do teor de CO_2 na proteção gasosa. Além disso, o autor percebeu que gases com maior

concentração de CO_2 também possuem uma tendência em gerar respingos de maior diâmetro, se comparados ao Ar e gases com baixa concentração de CO_2 .

Os resultados obtidos estão de acordo com a análise qualitativa, em que as soldas realizadas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ produziram quantidade relativamente baixas de escória e respingos, enquanto as soldas realizadas com CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ produziram quantidades mais elevadas.

De modo geral, a adição de C_3H_6 foi mais significativa para o CO_2 , com uma redução significativa nas taxas de escória e respingos gerados. Uma menor quantidade de respingos gerados resulta em menos paradas para a realização da limpeza do equipamento de soldagem devido ao acúmulo de respingos na tocha. A redução dos tempos de parada implica em maior tempo efetivo de soldagem, o que resulta em maior produtividade geral do processo de soldagem.

Em resumo, a adição de C_3H_6 foi benéfica para o CO_2 , pois resultou em maior estabilidade do processo, com uma redução significativa da escória e dos respingos gerados, e por outro lado prejudicou a estabilidade do processo com o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, levando a um aumento da escória e respingos gerados.

4.2.5. Taxa de deposição

Para o cálculo da taxa de deposição (TD), os corpos de prova foram pesados antes e após a soldagem, com uma balança com resolução de 0,1g. Os tempos de soldagem para cada um dos corpos de prova foram calculados com bases nos dados fornecidos pelo sistema SAPv4.

- $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$

A tabela 40 e a figura 51 mostram a variação dos valores da TD para as soldas que utilizaram $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ como gases de proteção. Os maiores valores de TD correspondem as soldas realizados com V_{alim} de 5 m/min, o que já era esperado, visto que o aumento da V_{alim} resulta em maior quantidade de metal de adição sendo fornecida (Scotti e Ponomarev, 2014).

Ao se comparar os resultados apresentados é possível observar que a adição de C_3H_6 gerou uma leve tendência em diminuir os valores de TD. Esta leve redução dos valores de TD foi atribuída a maior quantidade de respingos e

escória gerados durante a soldagem devido a adição de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$ como mostra a tabela 40. De acordo Tusek e Suban (2000), as quantidades de escória e de respingos são fatores que influenciam a eficiência do processo de soldagem. Segundo Kang e Rhee (2001), um aumento na quantidade de respingos gerados resulta em um redução na eficiência de deposição do processo de soldagem.

É possível observar que a maior queda ocorreu para as juntas de topo (AP4V e AP5V), que foi atribuída ao formato da junta, que permite que a tocha fique mais próxima ao chanfro, com isso o gás de proteção atua de forma mais efetiva sobre a solda.

Em seu trabalho, Polonine (2018), que utilizou V_{alim} de 5 m/min, obteve resultados semelhantes, com uma diminuição da TD após a adição de C_3H_6 , que o autor relacionou à maior quantidade de respingos gerados.

Tabela 40 – Cálculo da Taxa de Deposição

CP	Peso Antes da soldagem (g)	Peso após a soldagem (g)	Tempo de Soldagem (s)	Metal depositado (g)	Taxa de deposição (kg/h)	Diferença (%)
AR4V	1232,1	1254,6	36,29	22,5	2,23	5,8
AP4V	1241,8	1262,6	35,73	20,8	2,10	
AR5V	1177,6	1206,1	36,95	28,5	2,78	11,9
AP5V	1307,0	1332,1	35,51	25,1	2,54	
AR4T	955,6	977,8	35,57	22,2	2,25	4,4
AP4T	952,3	974,7	37,29	22,4	2,16	
AR5T	956,2	983,1	35,49	26,9	2,73	2,2
AP5T	968,4	995,7	36,83	27,3	2,67	

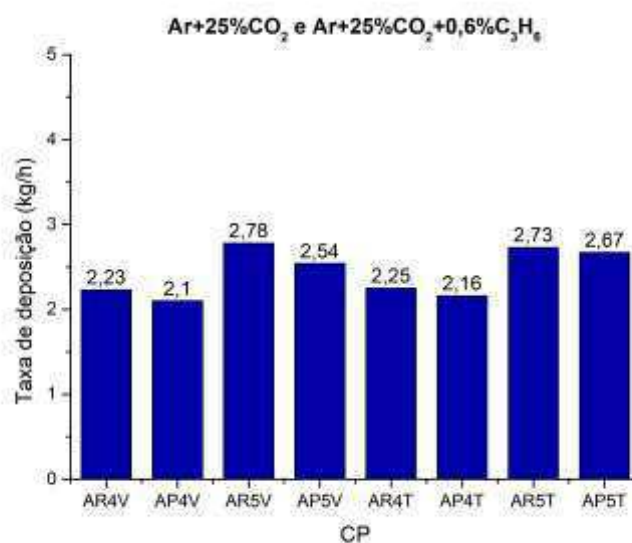


Figura 51 – Taxa de Deposição das soldas que utilizaram $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$

- CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆

A tabela 41 e a figura 52 mostram a variação dos valores da TD para as soldas que utilizaram CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆ como gases de proteção. Analisando os resultados, é possível observar que, de modo geral, a adição de C₃H₆ ao CO₂ resultou em um ligeiro aumento da TD.

O aumento na TD foi atribuído à redução da escória e respingos gerados durante a soldagem, após a adição de C₃H₆, como visto no item 4.2.4. É possível perceber que as soldas com junta de topo com chanfro em V apresentaram valores ligeiramente maiores para a TD com relação as soldas com juntas em T. Este comportamento foi atribuído à forma da junta em V, que permite que a tocha fique mais próxima ao chanfro, possibilitando que o gás atue de forma mais significativa sobre a poça de fusão durante a soldagem.

Em seu trabalho, Polonine (2018) também observou este mesmo comportamento, com o aumento do valor da TD, que o autor atribuiu à liberação de H₂ devido a decomposição do C₃H₆, que agiu como redutor controlando o potencial de oxidação do gás de proteção. Os resultados obtidos por Ribeiro (2016) também foram semelhantes, que relatou uma tendência no aumento dos valores de TD das soldas após a adição de C₃H₆.

Tabela 41 – Cálculo da Taxa de Deposição

CP	Peso Antes da soldagem (g)	Peso após a soldagem (g)	Tempo de Soldagem (s)	Metal depositado (g)	Taxa de deposição (kg/h)	Diferença (%)
CO4V	1202,7	1222,6	37,49	19,9	1,91	10,1
CP4V	1169,2	1191,5	37,90	22,3	2,12	
CO5V	1240,9	1268,2	36,69	27,3	2,68	5,2
CP5V	1234,4	1263,9	37,64	29,5	2,82	
CO4T	973,2	995,3	37,34	22,1	2,13	1,4
CP4T	973,2	995,6	37,41	22,4	2,16	
CO5T	951,6	979,1	37,25	27,5	2,66	2,6
CP5T	964,0	992,5	37,52	28,5	2,73	

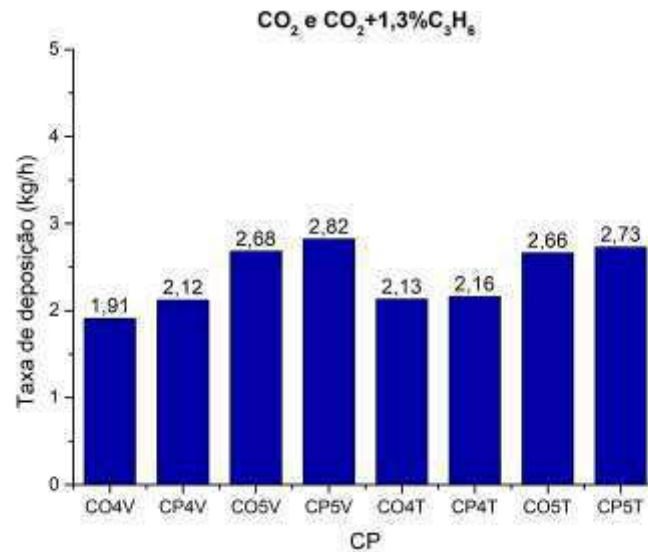


Figura 52 – Taxa de Deposição das soldas que utilizaram CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$ como gás de proteção

De modo geral, a adição de C_3H_6 foi benéfica para o CO_2 , que resultou em aumento da TD em ambos os valores de V_{alim} e tipos de junta. Uma maior TD significa uma maior quantidade de material sendo transferido para a solda, reduzindo as perdas, e resultando em maior eficiência do processo de soldagem.

4.2.6. Análise geométrica

Para a realização da análise geométrica dos cordões de solda, foi preparada uma amostra da seção transversal dos corpos de prova para cada um dos gases de proteção, tipos de junta e valores de V_{alim} utilizados.

4.2.6.1. Junta de Topo

As figuras 53 e 54 mostram as macrografias das soldas com juntas de topo com chanfro em V e a tabela 42 mostra os valores medidos de penetração de raiz, largura e reforço. Durante a análise das macrografias não foram detectados indícios de descontinuidades internas na região da junta soldada.

- V_{alim} de 4 m/min

Com relação as soldas realizadas com $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$, é possível perceber que AR4V e AP4V não apresentaram diferenças significativas com relação ao reforço e largura. No entanto após a adição de C_3H_6 ocorreu uma ligeira redução da penetração de raiz.

Já as soldas realizadas com CO_2 e $CO_2+1,3\%C_3H_6$ não apresentaram variações significativas com relação ao reforço e largura, no entanto, após a adição de C_3H_6 , houve um aumento da profundidade de penetração.

- V_{alim} de 5 m/min

As soldas realizadas com $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$ não apresentaram diferenças significativas entre suas dimensões. Nota-se apenas uma pequena redução da profundidade de penetração apresentada por AP5V.

Com relação ao CO_2 e $CO_2+1,3\%C_3H_6$, as soldas realizadas não apresentaram variação significativas com relação ao reforço e largura. No entanto, houve um ligeiro aumento da profundidade de penetração após a adição de C_3H_6 .

Tabela 42 – Dimensões dos cordões de soldas dos corpos de prova com junta de Topo

CP	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração da raiz (mm)
AR4V	0,84	5,43	0,59
AP4V	0,81	5,46	0,35
CO4V	0,6	5,95	0,62
CP4V	0,59	6,04	0,8
AR5V	1,26	5,98	0,56
AP5V	1,09	6,1	0,33
CO5V	1,12	6,26	0,52
CP5V	0,98	6,29	0,77

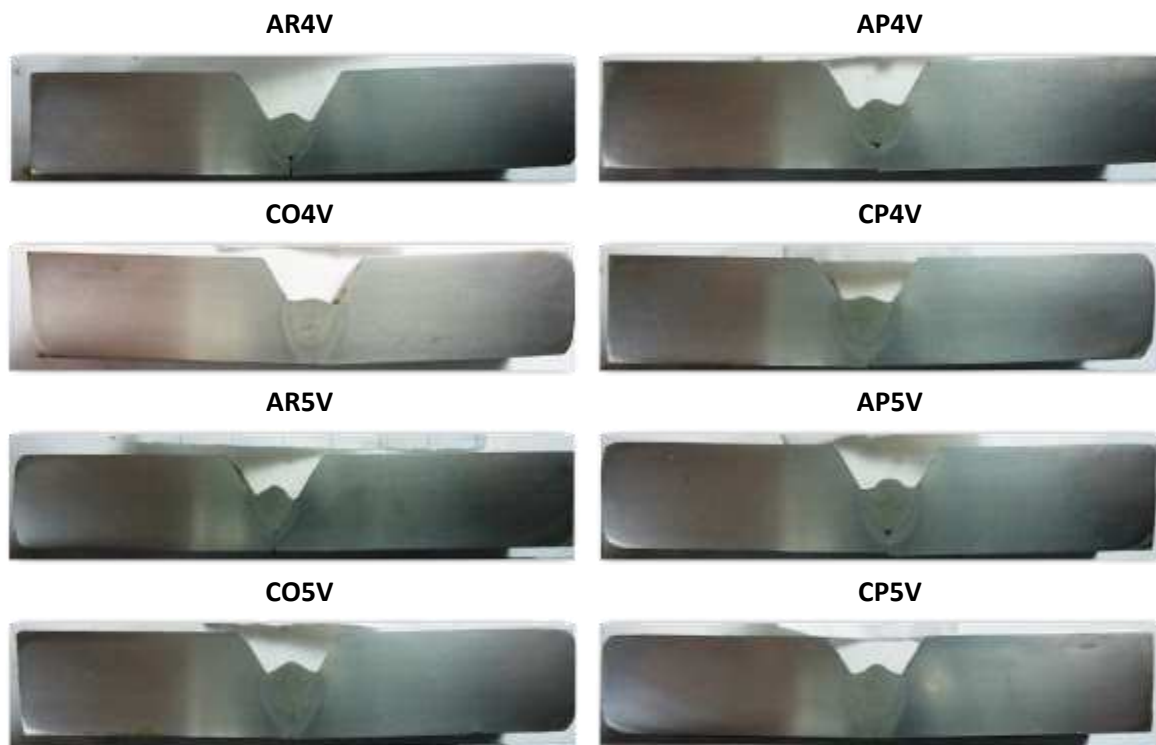


Figura 53 – Macrografias dos corpos de prova com junta de topo

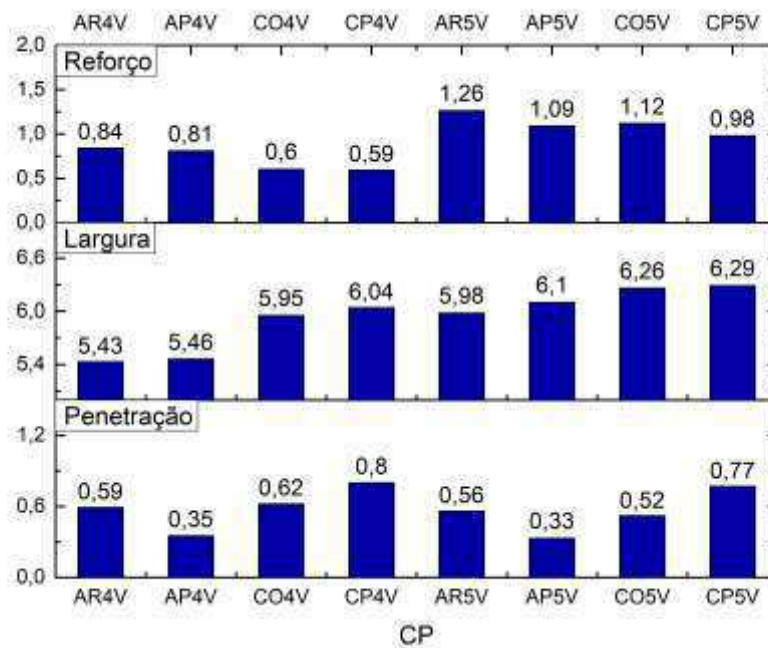


Figura 54 - Dimensões dos cordões de solda dos corpos de prova com junta de topo

De modo geral, a adição de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$, resultou em uma ligeira redução da profundidade de penetração da raiz, sendo que as demais medições

não apresentaram variações significativas. Este comportamento foi atribuído ao menor rendimento do processo causado após a adição de C_3H_6 , que resultou em maior geração de respingos e escória e uma ligeira redução da TD, como visto nos itens 4.2.4 e 4.2.5.

A adição de C_3H_6 ao CO_2 resultou em um leve aumento da profundidade de penetração para ambos os valores de V_{alim} . O que está de acordo com os resultados da análise da taxa de respingos e escória, que foram ligeiramente menores para as soldas realizadas com $CO_2+1,3\%C_3H_6$, e com o ligeiro aumento apresentado pela TD calculadas.

As soldas realizadas com CO_2 e $CO_2+1,3\%C_3H_6$ apresentaram menor reforço e maior largura se comparadas as soldas realizadas com $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$. Este comportamento já era esperado em virtude da maior tensão aplicada quando se utilizou os gases com maior concentração de CO_2 . De acordo com Modenesi (2006), um aumento no valor da tensão resulta em cordões de solda com menor reforço e maior largura.

4.2.6.2. Junta em Ângulo

A figura 55 mostra as macrografias das soldas com junta em Ângulo. A tabela 43 e a figura 56 mostram os resultados das medições realizadas à partir das macrografias.

Durante a análise, não foram detectadas as presenças de descontinuidades internas nas soldas analisadas.

De acordo com a tabela 44, é possível perceber que as soldas realizadas com V_{alim} de 5 m/min apresentaram maiores dimensões em relação as soldas com V_{alim} de 4 m/min. Este comportamento já era esperado, uma vez que o incremento no valor da V_{alim} resulta em maior quantidade de metal de adição sendo fornecido durante o processo de soldagem (Scotti e Ponomarev, 2014).

De modo geral, a adição de C_3H_6 não resultou em alterações significativas das dimensões apresentadas pelos cordões de solda.

Tabela 43 - Dimensões dos cordões de soldas dos corpos de prova com junta em T

CP	Garganta Efetiva (mm)	Perna Horizontal (mm)	Perna Vertical (mm)
AR4T	4,48	3,74	4,76
AP4T	4,4	3,64	4,7
CO4T	4,18	4,34	3,81
CP4T	4,39	4,4	4,03
AR5T	4,73	3,95	4,84
AP5T	4,65	4,24	4,76
CO5T	4,68	4,59	4,62
CP5T	4,72	4,64	4,71

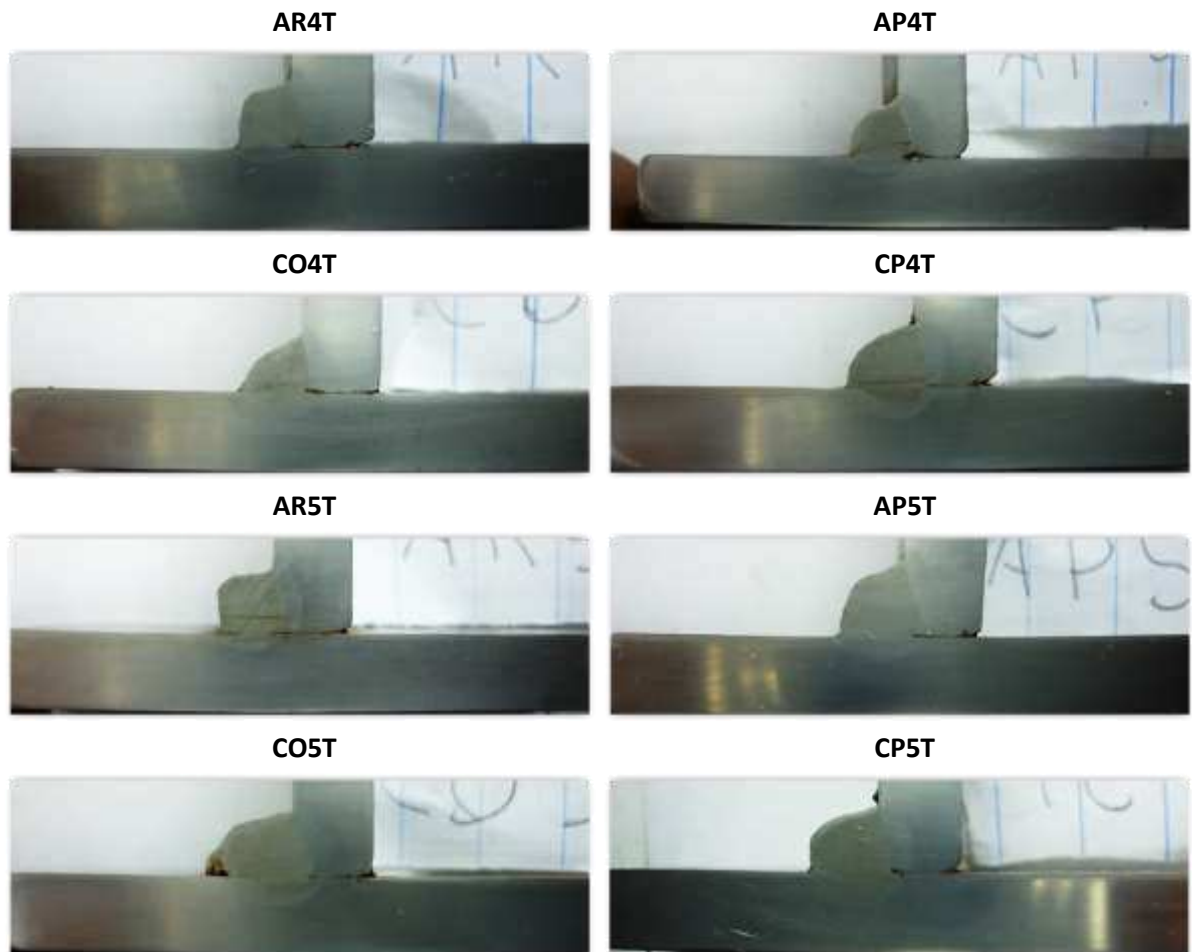


Figura 55 – Macrografias dos corpos de prova com junta em Ângulo

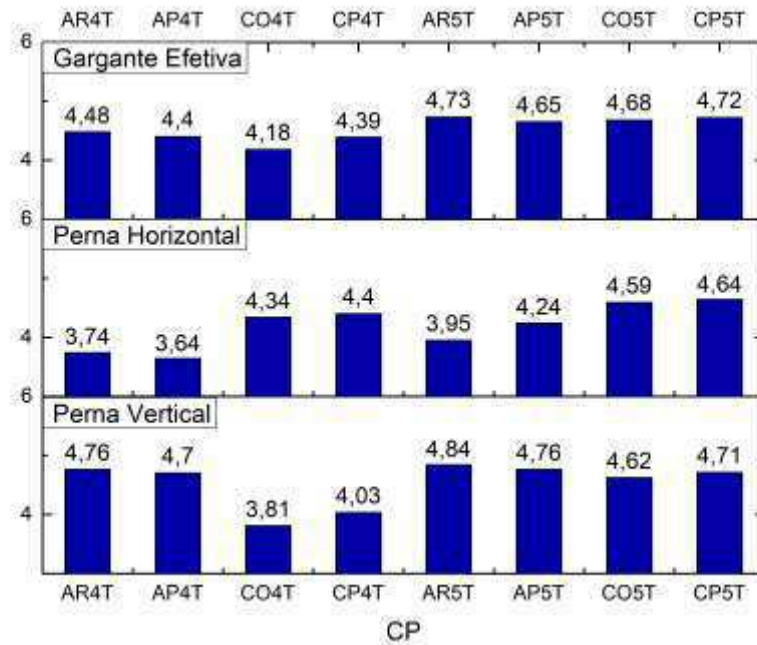


Figura 56 - Dimensões dos cordões de solda dos corpos de prova com junta em ângulo

Os cordões que utilizaram CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$, apresentaram maiores valores de perna horizontal, e valores de perna vertical ligeiramente menores se comparados aos cordões que utilizaram $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$. Este comportamento foi atribuído à maior tensão utilizada para os gases com maior concentração de CO_2 . O aumento da tensão resulta em cordões de solda mais largos e com menor reforço (Scotti e Ponomerev, 2014). No caso das juntas em ângulo, o maior valor de tensão agiu de forma similar, reduzindo o comprimento da perna vertical e aumento o comprimento da perna horizontal.

4.2.7. Considerações sobre a etapa II

As soldas produzidas com as juntas de topo e de ângulo apresentaram bom aspecto, uniformidade, e níveis reduzidos de respingos e escória para todos os gases, o que mostra que os parâmetros utilizados resultaram em estabilidade adequada.

De maneira geral, adição de C_3H_6 não afetou de forma significativa o processo de soldagem, não havendo alterações com relação ao aspecto ou a distribuição dos cordões de solda.

O coletor de respingos utilizado durante as soldagens se mostrou adequado, retendo a maior parte dos respingos e da escória gerados.

De modo geral, a adição de C_3H_6 foi benéfica ao CO_2 , pois levou a uma redução significativa da escória e respingos gerados, um pequeno aumento da TD, e valores ligeiramente maiores de penetração de raiz e garganta efetiva. Isto mostrou uma maior eficiência do processo de soldagem em virtude da adição de C_3H_6 , aumentando a produtividade. Por outro lado, a adição de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$ não apresentou vantagens, o que resultou em maiores quantidades de respingos e escória gerados, uma pequena diminuição da TD, e em menores valores de penetração de raiz, reduzindo a eficiência do processo.

Ao se comparar os dois valores de V_{alim} utilizados, é possível perceber que a adição de C_3H_6 na V_{alim} de 4 m/min não foi efetiva, com a estabilidade não variando de forma significativa. Já com a V_{alim} de 5 m/min, os efeitos do C_3H_6 foram mais evidentes, com relação ao $Ar+25\%CO_2$ houve uma redução nos valores dos índices de estabilidade, no entanto, as quantidades de escória e respingos aumentaram consideravelmente, reduzindo a eficiência do processo. Por outro lado, apesar do aumento da V_{alim} para 5 m/min não ter provocado alterações significativas dos índices de estabilidade do CO_2 , houve uma redução significativa da escória e respingos produzidos, além de uma elevação da TD, o que torna o processo mais produtivo. Isto mostra que a adição de C_3H_6 é mais efetiva para maiores valores de V_{alim} .

Em resumo, a adição de C_3H_6 foi benéfica para o CO_2 , aumentando a produtividade do processo de forma geral, mas não foi efetiva para o $Ar+25\%CO_2$, resultando em redução da eficiência do processo. O comportamento geral dos gases mostra que o CO_2 é um gás adequado para ser utilizado com a adição de C_3H_6 , já no caso do $Ar+25\%CO_2$ um estudo mais detalhado poderia determinar se a adição de C_3H_6 poderia ser viável em diferentes proporções.

4.3. Etapa III

Nesta etapa foram realizadas as análises microestrutural e de dureza dos cordões de solda. Para isso, foram retiradas amostras das seções transversais das soldas realizadas com V_{alim} de 5 m/min e junta de topo com chanfro, que passaram por preparação metalográfica como descrito em Materiais e Métodos.

4.3.1. Análise microestrutural

A figura 57 mostra a variação da microestrutura ao longo das regiões que compõe a junta soldada.

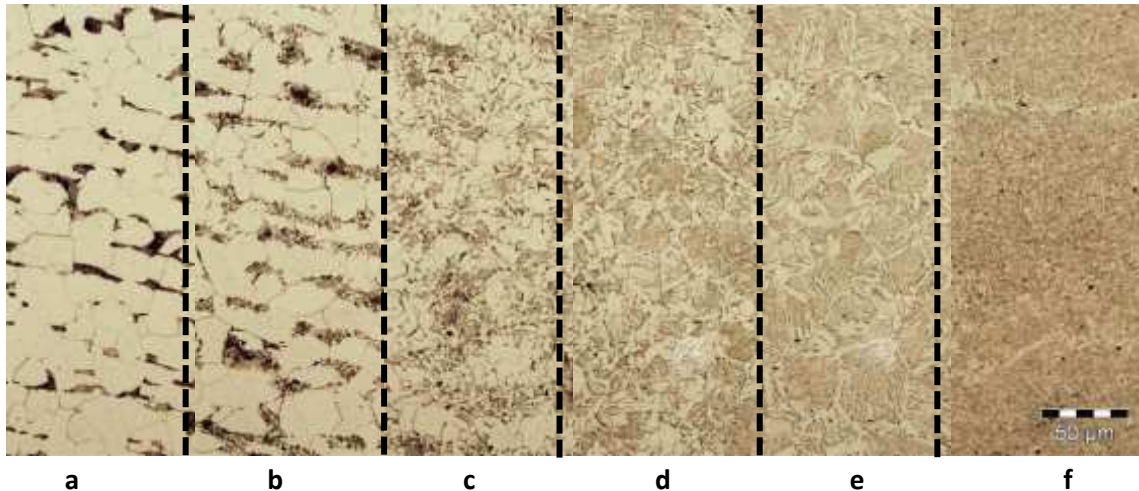


Figura 57 – Evolução microestrutural da junta soldada com Ar+25%CO₂. Aumento de 400x
a) Metal Base, b) Região Subcrítica, c) Região Intercrítica, d) Região de Normalização,
e) Região de granulação Grosseira, f) Zona Fundida

As três regiões, metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF), se apresentam bem definidas, e a transição entre elas ocorre de forma suave. As quatro amostras apresentaram uma microestrutura semelhante para MB e ZTA, já a ZF apresentou variações nas quantidades das fases presentes de acordo com o tipo de gás utilizado.

O MB (fig. 57a) apresentou uma microestrutura típica de um aço baixo carbono, com predominância de grãos de ferrita, e em menor quantidade grãos de perlita. Como esperado, por estar mais afastada da fonte de calor, esta região não atingiu temperaturas suficientemente altas a ponto de causar alterações em sua microestrutura.

A ZTA também apresenta morfologias típicas para um aço carbono, sendo possível identificar as diferentes regiões que a compõe. A região subcrítica (fig. 57b) sofre apenas pequenas alterações microestruturais, que no geral se resumem a esferoidização de perlita, mantendo uma predominância de grãos de ferrita. A região intercrítica (fig. 57c) atinge temperaturas entre 700° e 900° C, que proporcionam uma transformação parcial da microestrutura de ferrita-perlita,

resultando em uma microestrutural com predominância de grãos de ferrita. A região de normalização (fig. 57d) atinge temperaturas entre 900° a 1200° C, possuindo uma microestrutura similar aos aços normalizados, composta por grãos finos de ferrita e em menor quantidade perlita. A região de granulação grosseira (fig. 57e) atinge temperaturas em torno de 1200° C resultando em elevado crescimento de grão, a microestrutura final dessa região possui estruturas de placas de ferrita-perlita e ferrita de contorno de grão.

A ZF (fig. 57f) apresenta a microestrutura mais complexa, formada por grãos de austenita, que durante o resfriamento da solda se decompõe em agregados de ferrita e carbonetos.

A figura 58 mostra as micrografias da ZF dos cordões de solda, com aumento de 500x.

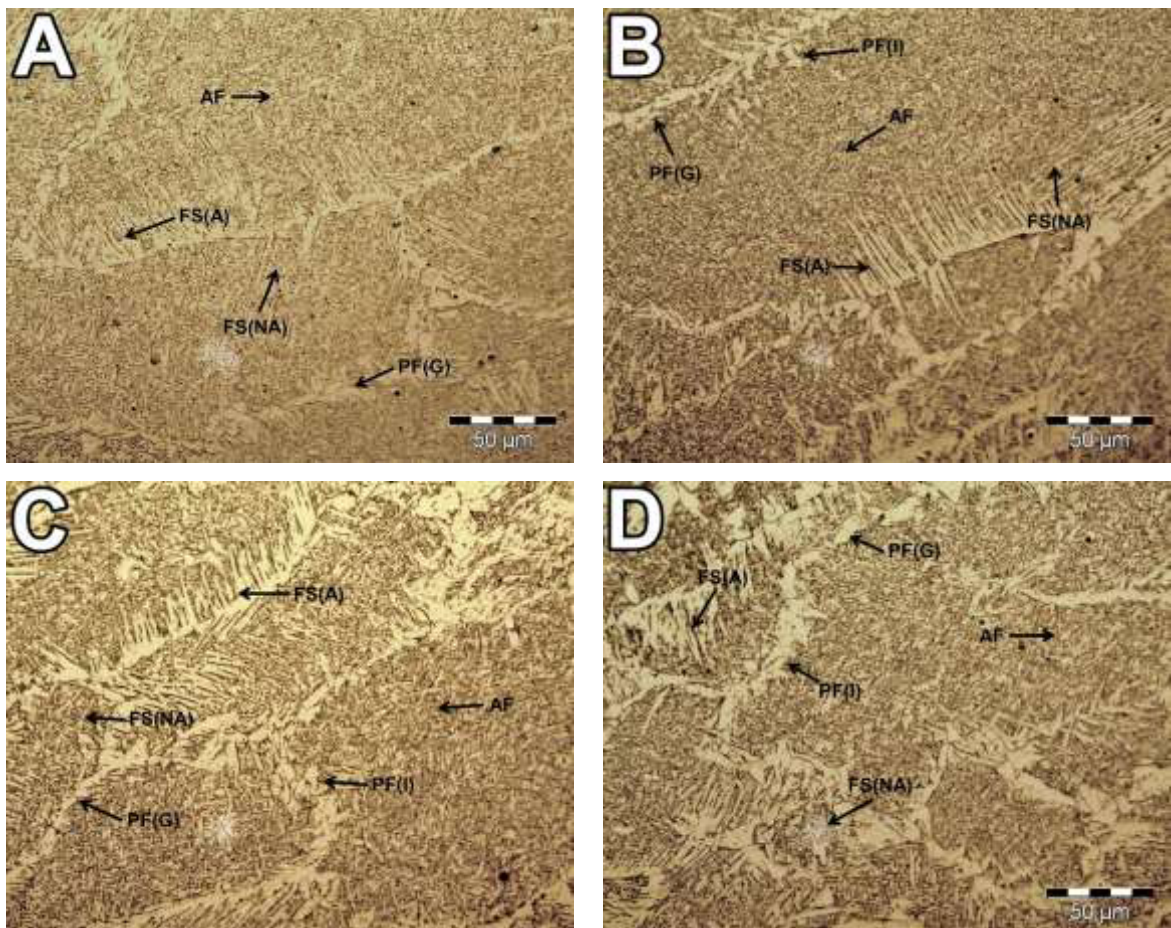


Figura 58 – Micrografias das ZF dos corpos de prova, aumento de 500x:
 A - Ar+25%CO₂, B - Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, C - CO₂ e D - CO₂+1,3%C₃H₆

As microestruturas das quatro amostras apresentaram uma predominância das fases ferrita acicular (AF), ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)) e ferrita de contorno de grão (PF(G)), e em menor quantidade ferrita não alinhada de segunda fase (FS(NA)) e ferrita poligonal intragranular (PF(I)). Como o aço utilizado foi o SAE 1020, que possui baixo teor de carbono, a ZF não apresentou as fases martensita e agregados ferrita-carbetos. As microestruturas apresentadas estão de acordo com o descrito por Silva, et. Al. (2001), e também foram observadas por Tatagiba (2015), Menezes (2016), Ribeiro (2016), Santos (2018) e Polonine (2018) em seus trabalhos.

A ZF dos cordões de solda depositados com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ (fig. 58A e 58B) apresenta maior quantidade de AF em relação as quantidades de PF e FS(A). Este comportamento foi atribuído a presença de Mn e Si no arame ER70S-6, que são elementos desoxidantes. Como tanto o Ar+25%CO₂ quanto o Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ possuem um baixo potencial de oxidação, apenas uma pequena quantidade desses elementos será consumida na reação com o O₂ presente na atmosfera, enquanto o restante pode ficar retido no cordão de solda. A presença destes elementos resulta em um aumento da temperabilidade, levando à um refinamento da microestrutura, com formação preferencial de AF em lugar de PF e FS(A) como descrito por Kah & Martikainen (2013) e Modenesi (2004).

As soldas realizadas com CO₂ e CO₂+1,3%C₃H₆ (fig. 58A e 58B) apresentam quantidades equivalentes de AF, PF e FS(A). Devido ao elevado potencial de oxidação desses gases, grande parte do Mn e Si é consumida na reação com o O₂ proveniente da decomposição do CO₂. A possibilidade da presença desses elementos retidos nos cordões de solda é menor, o que implica em uma menor temperabilidade, resultando em menor formação de AF (Modenesi, 2004).

Ao se comparar as microestruturas apresentadas pelas ZF, é possível perceber que as soldas que utilizaram gases com maior concentração de CO₂ apresentaram menores quantidades de AF, como mostra a figura 58C e 58D. Este comportamento, como mencionado acima, foi atribuído a possível presença de Mn e Si retidos nos cordões de solda realizados com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, que, como indica a literatura, podem resultar em refinamento da microestrutura.

De maneira geral, não foi possível perceber alterações causadas pela adição de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$ e CO_2 à microestrutura da ZF dos cordões de solda. Como pode ser visto pela figura 58, as microestruturas apresentadas pelas soldas realizadas utilizando gases com adição de C_3H_6 foram visualmente semelhantes às apresentadas pelas soldas realizadas com gases convencionais.

Os resultados estão de acordo com o trabalho de Polonine (2018), que mostra que a adição de C_3H_6 não resultou em alterações microestruturais significativas.

4.3.2. Dureza Vickers

A tabela 45 mostra os valores de dureza unitários, a tabela 46 mostra os valores médios de dureza das regiões que compõe as soldas realizadas com $Ar+25\%CO_2$, $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$, CO_2 e $CO_2+1,3\%C_3H_6$, e a figura 59 mostra os perfis de dureza das amostras analisadas.

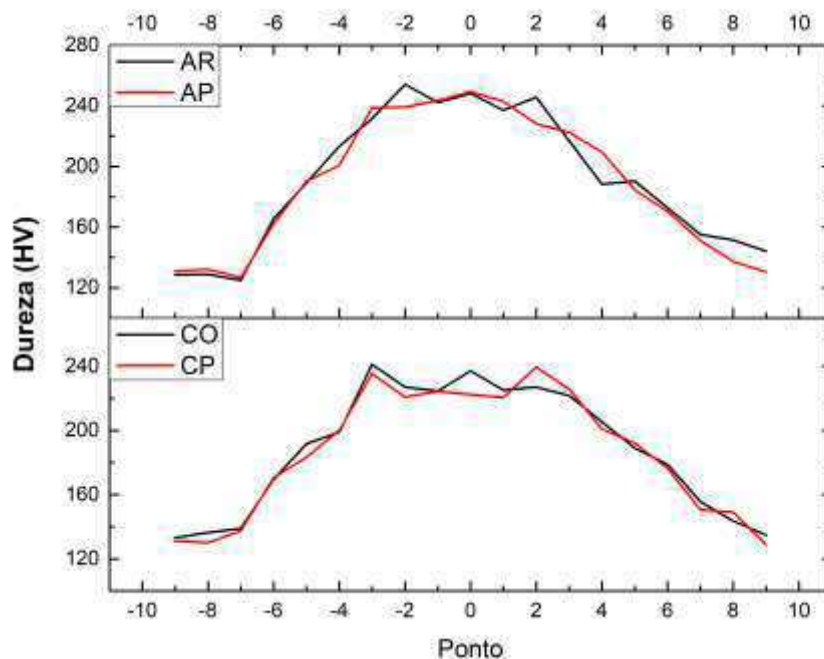


Figura 59 – Perfis de dureza

AR – $Ar+25\%CO_2$, AP – $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$, CO – CO_2 , CP – $CO_2+1,3\%C_3H_6$

Tabela 44 – Valores de dureza medidos

Região	Ponto	Ar+25%CO ₂	Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	CO ₂	CO ₂ + 1,3%C ₃ H ₆
MB	-9	128,6	131,0	133,1	131,0
	-8	128,8	132,1	136,4	130,0
	-7	124,8	126,7	138,9	137,4
ZTA	-6	165,7	162,4	169,7	170,7
	-5	189,0	190,2	191,7	183,4
	-4	213,3	200,7	198,9	200,2
ZF	-3	231,5	238,8	241,2	235,5
	-2	254,1	239,2	227,1	220,9
	-1	242,2	243,4	224,6	224,3
	0	248,2	249,3	237,1	222,4
	1	237,1	242,9	225,2	220,6
	2	245,7	228,3	227,1	239,5
	3	216,8	222,4	221,8	225,9
	4	188,3	209,6	205,5	201,0
ZTA	5	190,4	184,6	189,0	192,1
	6	172,8	170,3	178,9	176,5
	7	155,2	151,2	155,6	150,6
MB	8	151,4	137,4	143,5	149,0
	9	144,0	130,3	134,8	129,0

Tabela 45 – Valores médios de dureza

Região	Ar+25%CO ₂	Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	CO ₂	CO ₂ + 1,3%C ₃ H ₆
MB	136,4	131,6	137,7	134,2
ZTA	188,7	187,4	190,4	187,8
ZF	242,2	239,2	227,1	224,3

O MB (pontos -9 a -7 e 7 a 9 da tabela 45) apresentou valores de dureza variando entre 124,8 e 155,6 HV, o que está de acordo com os valores indicados pela literatura para um aço baixo carbono, que variam entre 125 a 150 HV (ArcelorMittal, 2013). Isto já era esperado, visto que esta região não atinge temperaturas suficientemente altas a ponto de causar alterações microestruturais.

Os valores de dureza médios do MB apresentados pela tabela 46 para os quatro gases foram relativamente próximos, variando de 131,6 a 137,7 HV. Este comportamento, está de acordo com a análise microestrutural, onde não foram percebidas diferenças significativas nas microestruturas apresentadas por esta região para os quatro gases utilizados, que apresentaram uma microestrutura semelhante à da figura 57a.

A ZTA (pontos -6 a -4 e 4 a 6 da tabela 45) apresentou valores crescentes de dureza, variando de 162,4 HV, em pontos mais afastados da ZF, até 213,3 HV, em pontos mais próximos à ZF, o que está associado as diferentes morfologias que compõe esta região. A maior proximidade com a ZF resulta em maiores temperaturas, e conseqüentemente, maior crescimento dos grãos de austenita, que após o resfriamento final se decompõe, elevando a dureza da região. Os valores médios de dureza apresentados pela ZTA foram equivalentes para os quatro gases de proteção, variando de 187,4 a 190,4 HV, o que está de acordo com a análise estrutural, onde as soldas realizadas apresentaram microestruturas para esta região.

A ZF (pontos -3 a 3 da tabela 45) apresentou os maiores valores de dureza entre as três regiões analisadas, variando entre 216,8 a 254,1 HV. Estes valores mais elevados são atribuídos a predominância de ferrita acicular, que se apresenta na forma de grãos pequenos e não alinhados localizados no interior dos grãos de austenita prévia. A granulometria muito fina dessa fase e a diferença na orientação cristalina dos grãos contribui para uma elevada dureza apresentada por esta região. A ZF também apresentou os maiores valores de dureza média entre as três regiões, variando entre 224,3 a 242,2 HV, resultado de sua microestrutura complexa.

Comparando os valores médios de dureza, apresentados pela tabela 46, das soldas realizadas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ em relação aquelas que utilizaram CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\%\text{C}_3\text{H}_6$, é possível perceber que, quando foram utilizados os gases com maior concentração de CO_2 houve uma queda de cerca de 15 HV nos valores médio de dureza da ZF. Este comportamento foi atribuído a diferenças nas microestruturas apresentada pela ZF, onde os gases com maior concentração de CO_2 apresentaram menores quantidades de AF, e maiores quantidades de PF e FS(A).

De modo geral, após a adição de C_3H_6 , não foi possível perceber alterações significativas, com as soldas realizadas com os gases com adição de C_3H_6 apresentando valores médios de dureza próximos aos apresentados pelas soldas que utilizaram gases convencionais, como mostra a tabela 46. Esses resultados estão de acordo com a análise microestrutural, em que não foi possível notar alterações significativas na microestrutura apresentada pela ZF das soldas em função da adição de C_3H_6 .

Os resultados obtidos estão de acordo com o mostrado por Ribeiro (2016) e Polonine (2018), onde a adição de C_3H_6 não resultou em alteração significativa nos valores de dureza. Deste modo é possível realizar soldas utilizando gases com a adição de C_3H_6 sem afetar de forma significativa a dureza do metal depositado.

4.3.3. Considerações sobre a etapa III

As microestruturas apresentadas pelo MB e ZTA foram semelhantes em todas as soldas realizadas, e os valores médios de dureza para estas regiões também foram próximos, o que mostra que o tipo de gás utilizado não afetou a microestruturas destas regiões.

A ZF das soldas realizadas com $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$ apresentaram maior quantidade de AF em relação às soldas realizadas com CO_2 e $CO_2+1,3\%C_3H_6$, que foi atribuído a uma provável presença de maiores quantidades de Si e Mn retidas nos cordões de solda. Em razão disso, as ZF das soldas realizadas com $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$ apresentaram valores de dureza mais elevados se comparadas as soldas realizadas com CO_2 e $CO_2+1,3\%C_3H_6$.

A adição de C_3H_6 não resultou em alterações significativas tanto na microestrutura do metal de solda, que manteve a predominância de AF, PF e FS(A), quanto nos valores de dureza apresentados por MB, ZTA e ZF.

5. CONCLUSÕES

Tendo como objetivo geral deste trabalho a avaliação dos efeitos da adição de 1,3% de C_3H_6 ao CO_2 puro e 0,6% de C_3H_6 a mistura de $Ar+25\%CO_2$, na soldagem de aço carbono utilizando o processo Gas Metal Arc Welding (GMAW) aplicado a juntas de topo e ângulo, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Para os quatro gases utilizados foi possível determinar uma faixa operacional em que a estabilidade do processo foi considerada adequada;
- A análise qualitativa mostrou que a adição de C_3H_6 aos gases convencionais não alterou o aspecto superficial e a do dos cordões de solda;
- A adição de C_3H_6 foi benéfica ao CO_2 , reduzindo as quantidades de escória e respingos, gerando um pequeno aumento na taxa de deposição, e aumentando os valores de garganta efetiva e penetração de raiz.
- A adição de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$ não foi vantajosa, resultando em maiores quantidades de escória e respingos, uma taxa de deposição ligeiramente menor e menor penetração de raiz
- A adição de C_3H_6 não se mostrou efetiva a V_{alim} de 4 m/min, no entanto, na V_{alim} de 5 m/min, proporcionou uma melhora do comportamento operacional do processo para o CO_2 , e uma piora para o $Ar+25\%CO_2$.
- A adição de C_3H_6 não resultou em alterações das microestruturas e dos valores de dureza apresentados pelas regiões que compõem os cordões de solda;
- De modo geral, a adição de C_3H_6 foi benéfica para o CO_2 , aumentando a produtividade e a estabilidade do processo de forma geral, e não apresentou vantagens para o $Ar+25\%CO_2$, resultando em redução da eficiência do processo.

6. SUGESTÕES

Apesar do caráter investigativo do presente trabalho, ainda existem algumas questões a serem abordadas. A seguir são listadas algumas sugestões visando futuros trabalhos:

- Alterar a quantidade de C_3H_6 adicionada ao $Ar+25\%CO_2$ e ao CO_2 , visando potencializar seus efeitos sobre a solda;
- Realizar uma avaliação mais detalhada da produtividade do processo GMAW com adição de C_3H_6 para determinar o impacto econômico;
- Analisar a composição química da escória gerada;
- Verificar a quantidade de fumos gerados durante a soldagem utilizando gases com adição de C_3H_6 ;
- Avaliar a aplicação dos gases com adição de C_3H_6 na soldagem em diferentes posições, e com a realização de múltiplos passes;

7. BIBLIOGRAFIA

ABENDI. (2008). LÍQUIDO PENETRANTE: PROCEDIMENTO DE END PR-001, 8.

ABENDI. (2011). ENSAIO VISUAL E DIMENSIONAL DE SOLDAS: PROCEDIMENTO DE END PR-050, 9.

AIR LIQUIDE. (2010). Mistura gasosa propileno em AR atmosférico. *Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico*, 4. Retrieved from https://industrial.airliquide.com.br/sites/industry_br/files/sds/2016/05/30/23.055_-_mistura_c3h6_propileno_em_ar.pdf

Alves, V. J. (2009). Desenvolvimento De Envelopes Operacionais Para Processo Mig/Mag Robotizado Com Diferentes Gases De Proteção. *Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul*, 172.

American Welding Sociely. (1994). *Standard Welding Terms and Definitions American Welding Sociely*.

ArcelorMittal. (2013). Guia do Aço.

ASTM. (1993). *Asm Handbook. ASTM International*, 6, 2873. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Baixo, C. E. I., & Dutra, J. C. (1995). Influência da Taxa de Variação da Corrente na Regularidade em Soldagem Mig/Mag por Curto Circuito. *Universidade Federal de Santa Catarina*, 18.

Barbedo, N. D. D. (2011). Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM a-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica. *Universidade Federal de Itajuba*, 82. Retrieved from <http://juno.unifei.edu.br/bim/0038675.pdf>

Bottin, B. (2000). Thermodynamic properties of arbitrary perfect gas mixtures at low pressures and high temperatures. *Progress in Aerospace Sciences*, 36, 33.

Bracarense, A. (2007). A soldagem GMWA (ou MIG-MAG). *Revista Da Soldagem*, 17.

BRACARENSE, A. Q. (2003). Gas Metal Arc Welding Guide. *Gas Metal Arc Welding, Product and Procedure Selection*, 96. Retrieved from http://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf

Campos, P. T. de. (2005). Caracterização Mecânica E Microestrutural De Juntas Soldadas Pelos Processos Mig/Mag (Gmaw) E Arame Tubular (Fcaw). *Pontifícia Universidade Católica Do Paraná*, 75.

Cardoso, F., Machado, A. A., & Colaço, F. H. G. (2015). Avaliação da Geometria do Cordão de Solda Depositado com Diferentes Gases pelo Processo GMAW. *Congresso Nacional de Soldagem, XLI CONSOLDA*, 8. Retrieved from <http://docente.ifsc.edu.br/fernandogruber/Artigos/1.pdf>

Cayo, E. H. (2008). Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos na Solda Baseada no Sensoriamento da Pressão Acústica do Arco Elétrico no Processo GMAW-S. *Universidade de Brasília*, 125.

Cirino, L. M. (2009). *Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG*. *Universidade Federal de Santa Catarina*.

De Meneses, V. A., Gomes, J. F. P., & Scotti, A. (2014). The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 1388–1397. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.012>

Dobignies, A. A. (2008). Estudo do Rendimento de Deposição de Material na Soldagem MIG/MAG em Condições de Transferência Metálica por Curto-Circuito Forçado. *Universidade Federal Do Parana*, (1), 148.

Dutra, J. C., Baixo, C. E., & Ollé, L. F. (1995). Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. *XXI Encontro Nacional de Tecnologia Da Soldagem- ENTS*, 867–902.

e Silva, R. H. G. (2005). Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz. *Universidade Federal de Santa Catarina*, 113.

ESAB. (2005). Soldagem MIG/MAG, 135. Retrieved from

http://www.esab.com.br/br/por/instrucao/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag.pdf

Farias, J. P., Sales, J. C., Luz, T. de S., & Rodrigues, C. E. A. L. (2002). Efeito Da Variação Do Gás E Do Tipo De Corrente Sobre O Desempenho Do Arame Tubular Aws E71T-1. *II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 10.

Filho, D. F. (2014). Influência Do Tipo De Gás De Proteção Da Soldagem Mig / Mag Na Qualidade Do Cordão De Aço Inoxidável. *Researchgate*, 10.

Filho, D., & Ferraresi, V. A. (2008). Influência Do Gás De Proteção Na Soldagem Com O Arame Er430Lnb. *IIW INTERNATIONAL CONGRESS 2nd Latin American Welding Congress XXXIV*, 2–7.

Filho, E. G. M. (2012). Estudo Da Influência Relativa Das Variáveis Do Processo De Soldagem Mig-Mag (Gmaw) No Passe De Raiz. *Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais Dissertação*, 91.

Fischer, A. (2011). Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW- arco pulsado. *Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais*, 170.

Fonseca, C. S. (2015). Influência Do Aporte Térmico Sobre a Microestrutura E a Susceptibilidade a Formação De Fase Sigma No Aço Inoxidável Duplex Saf2205. *Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais*, 105.

Fortes, C. (2005). Apostila de Soldagem MIG/MAG. *Revista Da Soldagem - ESAB*, 68. Retrieved from http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf

Gallego, J., & Ventrella, V. A. (2014). Inclusões na formação da ferrita acicular: caracterização por microscopia eletrônica de varredura. *69º Congresso Anual Da ABM*, 10.

Giraldo, J., Munos, D., Aristizábal, S., Suárez, J., Arbeláez, A., & Uribe, D. (2009). Construcción de curvas de corriente de soldadura contra velocidad de alimentación de alambre para el proceso GMAW. *Dyna*, 76(157), 206–212.

Gomes, E. B. (2006). Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito

aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi. *Universidade Federal de Itajuba*, 99.

Groetelaars, P. J., & Scotti, A. (2007). Influência do Teor de CO₂ no Gás de Proteção sobre a Transferência Metálica no Processo MIG / MAG Duplo-Arame. *Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório Para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA)*, 29–37.

Hermans, M. J. M., & Ouden, G. (1999). Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding. *Welding Journal-New York-*, 137–141. Retrieved from

<https://app.aws.org/wj/supplement/Hermans/ARTICLE4.pdf>
<http://files.aws.org/wj/supplement/Hermans/ARTICLE4.pdf>

Hu, J., & Tsai, H. L. (2007). Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(5–6), 833–846. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025>

IMC Soldagem. (2014). Manual SAP V4, 40. Retrieved from <http://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/sistemas-de-monitoramento/sap-v4>. Acesso em 6 de setembro de 2017.

Invernizzi, B. P. (2017). Soldagem circunferencial do aço inoxidável SUPER DUPLEX UNS S32750 pelo processo MIG com controle CMT. *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*, 106.

Johnson, J. A., Carlson, N. M., Smartt, H. B., & Clark, D. E. (1991). Process Control of GMAW : Sensing of Metal Transfer Mode. *Welding Journal*, 91–99.

Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 1411–1421. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>

Kang, M. J., Kim, Y., Ahn, S., & Rhee, S. (2003). Spatter rate estimation in the short-circuit transfer region of GMAW. *Welding Journal*, 82(9), 238–247.

Kang, M. J., & Rhee, S. (2001). The Statistical Models for Estimating the Amount of Spatter in the Short Circuit Transfer Mode of GMAW. *Welding Journal*, (January), 1–8.

Kobayashi, Y., Anastacio, A. C. S. A., & Nardi, C. (2005). Estudo da influência da variação da corrente de curto-circuito, através da indutância, sobre as características geométricas e rendimento real de deposição. *3º Congresso Brasileiro de Fabricação - COBEF*, 10.

Liskevych, O. (2010). Estudo Da Influência Do Teor De Co₂ Na Regularidade Da Transferência De Metal E Estabilidade Do Processo Mig / Mag. *Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório Para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA)*, 91.

Luksa, K. (2006). Influence of weld imperfection on short circuit GMA welding arc stability. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1–3), 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.053>

Marques, P. V., Modenesi, P. J., & Bracarense, A. Q. (2011). *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. Editora UFMG (3rd ed.). Belo Horizonte: Editora UFMG.

Marques, P. V., Modenesi, P. J., & Valente, O. B. (1998). Características do arco de soldagem tig em diferentes atmosferas. *Infosolda*, (031), 11.

Menezes, T. de P. (2016). Estudo da adição de hidrogênio em gases de proteção convencionais na soldagem GMAW de aço de baixo carbono. *Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro*, 93.

Mita, T., Sakabe, A., & Yokoo, T. (1988). Quantitative estimates of arc stability for CO₂ gas shielded arc welding. *Welding International*, 2(2), 152–159. <https://doi.org/10.1080/09507118809447460>

Modenesi, P. J. (2004). Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. *Universidade Federal de Minas Gerais*.

Modenesi, P. J. (2012). Introdução à Física do Arco Elétrico. *Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais*, 41. Retrieved from <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>

Modenesi, P. J., & Avelar, R. C. (1997). The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 226–232. <https://doi.org/10.1016/S0924->

0136(98)00315-X

Morales, R. F., Resende, A. A., & Scotti, A. (2006). Influência da adição de hélio no gás de proteção sobre a geometria do cordão de solda MIG/MAG de aço ao carbono. *Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório Para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA)*, 1–10.

Moreira, A. F., Gallego, J., Tokimatsu, R. C., Yamakami, W. J., & Ventrella, V. A. (2012). Efeito da adição de CO₂ na atmosfera protetora em processo de soldagem com arame tubular AWS E309LT-1. *Universidade Estadual Paulista*, 10.

Moreira, H. S. (2008). Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular. *Universidade de São Paulo*, 84.

Mostafa, N. . B., & Khajavi, M. N. (2006). Optimisation of welding parameters for weld penetration in FCAW. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 16(1), 13–17.

Motta, M. F. (2002). APLICAÇÃO DO PROCESSO MIG/MAG PULSADO COM DUPLO ARAME E POTENCIAIS ISOLADOS EM SOLDAGENS DE REVESTIMENTO. *Universidade Federal de Santa Catarina*, 174.

Mukhopadhyay, S., & Pal, T. K. (2006). Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(3–4), 262–268. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2510-7>

Nadzam, J., Armao, F., Byall, L., Kotecki, D., & Miller, D. (2011). Gas Metal Arc Welding. *Lincoln Electric*, 87. [https://doi.org/10.1074/JBC.274.42.30033.\(51\)](https://doi.org/10.1074/JBC.274.42.30033.(51))

Nogueira, R. M. U. (2015). Variabilidade do cordão de solda nos processos de soldagem MIG/MAG e Arame Tubular. *Universidade Federal de Santa Catarina*, 207.

Pessoa, E. F. (2007). Estudo Exploratório da Soldagem MIG/MAG com Duplo Arame Empregando Corrente Alternada. *Universidade Federal Do Ceará*, 153.

Polonine, A. F. (2018). ESTUDO DO EFEITO DO GÁS PROPILENO NO PROCESSO GMAW UTILIZANDO TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-

CIRCUITO. *Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro*.

Quinn, T. . P., Madigan, R. . B., & Siewert, T. A. (1994). An electrode extension model for gas metal arc welding. *Welding Journal Including Welding Research Supplement*, 73, 241.

Rao, Z. H., Hu, J., Liao, S. M., & Tsai, H. L. (2010). Modeling of the transport phenomena in GMAW using argon-helium mixtures. Part II - The metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5722–5732. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.08.010>

Resende, A. (2007). Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico. *Universidade Federal de Minas Gerais*, 121.

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

Ribeiro, R. B. G. (2016). Estudo do efeito da adição de gás combustível C₃H₆ nas atmosferas de proteção convencionais do processo GMAW. *Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro*, 186.

Roca, A. S., Fals, H. C., Fernández, J. B., Macías, E. J., & Adán, F. S. (2007). New stability index for short circuit transfer mode in GMAW process using acoustic emission signals. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(5), 460–466. <https://doi.org/10.1179/174329307X213882>

Sábio, A. D. (2007). *Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem MAG com alimentação adicional de arame frio*. Universidade Federal do Pára.

Santos, F. G. dos. PROTEÇÃO CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW EM JUNTAS DE TOPO E ÂNGULO FELIPE GOMES DOS SANTOS UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF (2018).

Scotti, A., & Ponomarev, V. (2014). *Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento Melhor desempenho*. ArtLiber (1st ed.). São Paulo: Artliber Editora.

Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. (2012). A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal of Materials*

Processing Technology, 212(6), 1406–1413.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021>

Silva, A. F., Delforge, D. Y. M., Tokimatsu., R. C., & Ventrella, V. A. (2001). ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO METAL DE SOLDA DE PERFIS SOLDADOS DE UM LADO SÓ UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. *Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira*, 3–4.

Silva, F. G. (2010). Estudo da viabilidade do processo de soldagem FCAW com adição de arame frio aplicado a indústria naval. *Universidade Federal Do Pará*, 151.

Silva, R. H. e, Dutra, J. C., & Ghor Jr, R. (2007). Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por curto-circuito controlado (CCC) – Uma revisão da literatura. Parte 1 de 3: Aspectos Históricos e dos Mecanismo de Fusão do Arame. *Soldagem & Inspeção*, 12(3), 237–243.

Soderstrom, E. J., & Mendez, P. F. (2008). Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-CO 2. *Welding Research*, 124–133.

Souza, D., Rossi, M. L., Keochequerians, F., do 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. *Soldagem e Inspecao*, 16, 22–32. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000100004>

Souza, D., Rossi, M. L., Keochequerians, F., Nascimento, V. C. do, Vilarinho, L. O., & Scotti, A. (2011). The influence of the welding voltage and of the shielding gas on the correlation between inductance and metal transfer regularity in short-circuiting MIG/MAG welding. *Soldagem & Inspeção*, 16, 114–123. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000200004>

Suban, M., & Tušek, J. (2003). Methods for the determination of arc stability. *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144(1), 430–437. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00416-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00416-3)

Tatagiba, L. C. (2015). Formulação de gases de proteção com adições de gases redutores para a soldagem MIG-MAG. *Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro*, 133.

Tatagiba, L. C., Golçaves, R. B., & Paranhos, R. da R. (2012). Tendências no

Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem Mig/mag. *Soldagem e Inspecao*, 17(3), 218–228.

Teske, M. (2006). Influência da composição do gás de proteção na soldagem do aço ASTM A516 pelo processo GMAW. *Soldagem e Inspecao*, 13(3), 190–198.

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*, 369–376. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(99\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(99)00033-6)

Weglowski, M. (2008). Effect of welding current on metal transfer in GMAW. *Archives of Materials Science and Engineering*, 33(1), 49–56. Retrieved from http://www.w.archivesmse.org/vol33_1/3318.pdf

Westin, E. M., Olsson, C. O. A., & Hertzman, S. (2008). Weld oxide formation on lean duplex stainless steel. *Corrosion Science*, 50(9), 2620–2634. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.024>

White Martins Praxiar. (2011). Gases Especiais e Equipamentos. *Catálogo de Gases Especiais*, 33–34. Retrieved from https://industrial.airliquide.com.br/sites/industry_br/files/sds/2016/05/30/23.055_-_mistura_c3h6_propileno_em_ar.pdf