

EFEITO DA ADIÇÃO DE PROPILENO EM MISTURAS DE PROTEÇÃO
Ar-CO₂ NA SOLDAGEM GMAW DO AÇO CARBONO E
TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

ANA HERMÍNIA MACHADO

UNIVERSIDADE ESTADUAL NORTE FLUMINENSE - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO DE 2019

EFEITO DA ADIÇÃO DE PROPILENO EM MISTURAS DE PROTEÇÃO
Ar-CO₂ NA SOLDAGEM GMAW DO AÇO CARBONO E
TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

ANA HERMÍNIA MACHADO

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

Orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
SETEMBRO DE 2019

EFEITO DA ADIÇÃO DE PROPILENO EM MISTURAS DE PROTEÇÃO
Ar-CO₂ NA SOLDAGEM GMAW DO AÇO CARBONO E
TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

ANA HERMÍNIA MACHADO

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 5 de setembro de 2019.

Comissão Examinadora:

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

Prof^a. Márcia Giardinieri de Azevedo (DSc. Engenharia Química) – UENF

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

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

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua infinita bondade em minha vida, me dando força e coragem para alcançar minha meta.

Aos meus pais por terem me ensinado a andar. A minha amada mãe Izabel e ao meu pai Luciano (in memoriam) que onde quer que esteja, sempre me protege.

Ao meu querido marido Willian Cabral por seu incentivo, amor e compreensão tão necessários nesse período.

As minhas lindas princesas Maria Clara e Maria Isabel, que são a luz da minha vida.

A todos os meus familiares, tia-mãe Adenilde, irmãos, sobrinhos, cunhadas por me ajudarem nessa jornada.

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

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.

Aos amigos encontrados na UENF: Ana Carolina, Anderson Polonine, Carolina Araújo, Guilherme Costa.

Ao técnico do laboratório do LAMAV, Silvio Gonçalves Mendes por toda a ajuda prestada durante este trabalho.

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

A todos que colaboraram de forma direta ou indiretamente neste trabalho: muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	X
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Justificativa	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Processo de Soldagem GMAW	5
2.2. O Arco elétrico na soldagem GMAW	8
2.2.1 Região catódica.....	10
2.2.2 Região anódica	10
2.2.3 Coluna de plasma	11
2.2.4 Emissão catódica	12
2.3 Transferência metálica.....	13
2.3.1 Forças atuantes na transferência metálica.....	15
2.3.1.1 Força gravitacional (F_g).....	17
2.3.1.2 Força associada a tensão superficial (F_y).....	17
2.3.1.3 Força eletromagnética (F_{em})	18
2.3.1.4 Força de arraste	18
2.3.1.5 Força de vaporização	19
2.3.2 Transferência por curto-circuito.....	20
2.3.3 Transferência globular.....	22
2.3.4 Transferência por spray	24
2.4 Estabilidade do processo.....	25
2.4.1 Indicadores de estabilidade.....	26
2.4.2. Aquisição dos sinais elétricos	29

2.5	Parâmetros do processo de soldagem	31
2.5.1	Corrente de soldagem	32
2.5.2	Tensão	33
2.5.3	Velocidade de Soldagem	34
2.5.4	Extensão livre do eletrodo	34
2.6	Gases de proteção	35
2.6.1	Propriedades dos gases de proteção.....	36
2.6.1.2	Densidade	37
2.6.1.3	Condutividade térmica	38
2.6.1.4	Potencial de oxidação.....	38
2.6.2	Gases de proteção convencionais	39
2.6.2.1	Argônio (Ar)	39
2.6.2.2	Dióxido de carbono (CO ₂).....	40
2.6.2.3	Hélio (He)	41
2.6.2.4	Oxigênio (O ₂)	41
2.6.3	Misturas gasosas	41
2.6.3.1	Misturas Ar-CO ₂	42
2.6.4	Propileno	43
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1.	Materiais	45
3.2	Equipamentos.....	46
3.3	Metodologia	46
3.3.1	Etapa 1	47
3.3.1.1	Preparação das chapas.....	47
3.3.1.2	Parâmetros de soldagem.....	47
3.3.1.3	Aquisição dos sinais elétricos.....	48
3.3.1.4	Análise Qualitativa	48
3.3.1.5	Avaliação dos sinais elétricos	49
3.3.2	Etapa 2.....	50
3.3.2.1	Soldagem	50
3.3.2.2	Aquisição dos sinais elétricos.....	50
3.3.2.3	Análise Qualitativa	50
3.3.2.4	Avaliação dos sinais elétricos.....	51

3.3.2.5 Taxa de respingo e escória	51
3.3.2.6 Taxa de deposição	52
3.3.2.7 Geometria do cordão de solda.....	52
3.3.3 Etapa 3.....	53
3.3.3.1 Microestrutura do metal de solda.....	53
3.3.3.2 Dureza Vickers	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 Etapa 1	56
4.1.1 Parâmetros de soldagem	56
4.1.2 Análise Qualitativa.....	56
4.1.2.1 Avaliação qualitativa dos resultados.....	71
4.1.3 Análise da estabilidade do arco elétrico	72
4.1.4 Determinação das faixas operacionais.....	82
4.1.5 Considerações finais da Etapa 1	84
4.2 Etapa 2	84
4.2.1 Análise Qualitativa.....	84
4.2.1.1 Avaliação qualitativa dos resultados.....	88
4.2.2 Análise da estabilidade do arco elétrico	88
4.2.3 Taxa de respingo e escória	93
4.2.4 Taxa de deposição	96
4.2.5 Geometria do cordão de solda	99
4.2.6 Considerações finais da Etapa 2.....	105
4.3 Etapa 3	106
4.3.1 Análise da microestrutura do metal de solda	106
4.3.2 Dureza Vickers	110
4.3.3 Considerações finais da Etapa 3.....	114
5. CONCLUSÕES.....	115
6. SUGESTÕES.....	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do processo de soldagem GMAW.....	6
Figura 2: Esquema do processo de soldagem GMAW.....	7
Figura 3: Distribuição de potencial em um arco e suas regiões	9
Figura 4: Isotermas no arco GTAW em argônio.....	12
Figura 5: Representação esquemática do mecanismo de emissão catódica	13
Figura 6: Esquema dos tipos de transferência metálica em GMAW	15
Figura 7: Forças estáticas atuantes na transferência metálica.....	16
Figura 8: Geração de força de arraste pelo fluxo do gás ao longo da gota.....	19
Figura 9: Esquema da transferência por curto-circuito.....	21
Figura 10: Imagens de filmagem de alta velocidade na soldagem.....	23
Figura 11: Oscilograma da transferência globular.....	23
Figura 12: Oscilograma típico da transferência goticular	24
Figura 13: Oscilograma de corrente (A) vs tempo (s) na soldagem por CC.....	29
Figura 14: Oscilograma de tensão (V) na soldagem.	30
Figura 15: Informações gerais dos sinais adquiridos pelo SAPV4	31
Figura 16: Relação entre a corrente de soldagem e a V_{alim}	33
Figura 17: Diferentes distâncias entre o bico de contato e a peça.....	35
Figura 18: Perfis de penetração dos gases de proteção	38
Figura 19: Coletor de respingos	51

Figura 20: Parâmetros geométricos de solda.....	53
Figura 21: Microestruturas principais do metal de solda	54
Figura 22: Localização dos pontos das medições de dureza Vickers	55
Figura 23: Variação dos índices em função da tensão de soldagem	73
Figura 24: Variação dos índices em função da tensão de soldagem	74
Figura 25: Variação dos índices em função da tensão de soldagem	76
Figura 26: Variação dos índices em função da tensão de soldagem	77
Figura 27: Variação dos índices em função da tensão de soldagem	78
Figura 28: Variação dos índices em função da tensão de soldagem	79
Figura 29: Variação dos índices em função da tensão de soldagem	80
Figura 30: Variação dos índices em função da tensão de soldagem.....	82
Figura 31: Gráfico dos índices de estabilidade.....	90
Figura 32: Gráfico dos índices de estabilidade.....	92
Figura 33: Gráfico das taxas de respingo e escória	94
Figura 34: Comparativo das médias da taxa de deposição.....	98
Figura 35: Macrografia dos cordões de solda	100
Figura 36: Média das dimensões dos cordões de solda	101
Figura 37: Macrografia dos cordões de solda	103
Figura 38: Média das dimensões dos cordões de solda	104
Figura 39: Micrografia metal de solda.	107
Figura 40: Micrografia metal de solda..	109

Figura 41: Curva de dureza dos gases de proteção:.....113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial de ionização dos gases de proteção	37
Tabela 2: Densidades dos gases de proteção do processo GMAW	37
Tabela 3: Especificação da composição química do metal base	45
Tabela 4: Composição dos gases de proteção	46
Tabela 5: Parâmetros mantidos fixos na soldagem das chapas	48
Tabela 6: IV e ensaio LP das soldas com Ar+25%CO ₂ – V _{alim} de 4 m/min	57
Tabela 7: IV e ensaio LP das soldas com Ar+25%CO ₂ – V _{alim} de 5 m/min	59
Tabela 8: IV e ensaio LP do Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ -V _{alim} de 4 m/min	61
Tabela 9: IV e ensaio LP do Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ – V _{alim} de 5 m/min	63
Tabela 10: IV e ensaio LP das soldas com Ar+12%CO ₂ – V _{alim} de 4 m/min	64
Tabela 11: IV e ensaio LP das soldas com Ar+12%CO ₂ – V _{alim} de 5 m/min	66
Tabela 12: IV e ensaio LP do Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ - V _{alim} de 4 m/min	68
Tabela 13: IV e ensaio LP do Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ - V _{alim} de 5 m/min.....	70
Tabela 14: Faixa de tensão conforme análise qualitativa.....	72
Tabela 15: Índices de estabilidade Ar+25%CO ₂ – V _{alim} de 4 m/min	73
Tabela 16: Índices de estabilidade Ar+25%CO ₂ – V _{alim} de 5 m/min	74
Tabela 17: Índices de estabilidade Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ V _{alim} de 4 m/min	75
Tabela 18: Índices de estabilidade Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆ - V _{alim} de 5 m/min.....	77
Tabela 19: Índices de estabilidade Ar+12%CO ₂ – V _{alim} de 4 m/min	78

Tabela 20: Índices de estabilidade Ar+12%CO ₂ – V _{alim} de 5 m/min	79
Tabela 21: Índices de estabilidade Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ - V _{alim} de 4 m/min	80
Tabela 22: Índices de estabilidade Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ - V _{alim} de 5 m/min	81
Tabela 23: Faixa operacional e tensão de trabalho.....	83
Tabela 24: IV e ensaio LP das soldas Ar+25%CO ₂ e Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	86
Tabela 25: IV e ensaio LP das soldas Ar+12%CO ₂ e Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	87
Tabela 26: Índices de estabilidade	89
Tabela 27: Índices de estabilidade	91
Tabela 28: Taxa de respingo e escória	93
Tabela 29: Valores da taxa de deposição	97
Tabela 30: Dimensões dos cordões de solda.....	101
Tabela 31: Dimensões dos cordões de solda.....	104
Tabela 32: Valores de dureza medidos na V _{alim} de 4 m/min	111
Tabela 33: Valores de dureza medidos na V _{alim} de 5 m/min	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A – Ampère
AF – Ferrita Acicular
Al – Alumínio
Ar – Argônio
atm – Atmosférica
AWS – do inglês *American Welding Society*
C – Carbono
CC – Corrente contínua
C₃H₆ – Propileno
cm – Centímetro
CO₂ – Dióxido de carbono
DBCP – Distância do bico de contato e a peça
DPPC – Desvio padrão de picos de corrente
ESAB – do sueco *Elektriska Svetsnings AKtie Bolaget*
eV – Eletron - volt
F_a – Força ao arraste
FAETEC – Fundação de Apoio à Escola Técnica
FC – Agregado Ferrita-Carbeto
F_{em} – Força ao efeito magnético
F_g – Força gravitacional
FS(A) – Ferrita com Segunda Fase Alinhada
FS(NA) – Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada
F_v – Força à vaporização
F_v – Força de tensão superficial
g – grama
GMAW – do inglês *Gas Metal Arc Welding*
GTAW - *Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*
h – Hora
H₂ – Hidrogênio
He – Hélio
HV – Microdureza Vickers
I – Corrente

IIW – Instituto Internacional de Soldagem (do inglês Institute International Welding)
IMC – Engenharia de Soldagem Instrumentação e Automação LTDA
K – Kelvin
L – Largura
LAMAV – Laboratório de Materiais Avançados
LP – Líquido penetrante
M – Martensita
m – metro
MAG – do inglês Metal Active Gás
MIG – do inglês Metal Inert Gás
min – minuto
Mn - Manganês
mm – Milímetro
ms – Milisegundo
 μm - Micromêtro
 N_2 – Nitrogênio
 O_2 – Oxigênio
P – Penetração
PF(G) – Ferrita de Contorno de Grão
PF(I) – Ferrita Poligonal Intragranular
PI – Potencial de ionização
PO – Potencial de oxidação
r – Reforço
s – Segundo
Si - Silício
Td – Taxa de deposição
U – Tensão
UENF – Universidade Estadual Norte Fluminense
V – Volts
Valim – Velocidade de alimentação
ZF – Zona Fundida
 \emptyset - Diâmetro

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a estabilidade do processo de soldagem GMAW nos gases de proteção convencionais $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e com a adição do gás combustível propileno $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$. A metodologia foi executada em três etapas. Na primeira etapa foram executados cordões de solda sobre chapas para determinar as faixas operacionais em que o processo apresentasse uma adequada estabilidade. Duas velocidades de alimentação de arame (4 m/min e 5 m/min) foram usadas para cada gás de proteção. Na segunda etapa foram realizadas novas soldas considerando os parâmetros operacionais selecionados na etapa 1. Foi analisada a aparência dos cordões, os índices da estabilidade do processo, a quantidade de escória e de respingos, a taxa de deposição e a geometria do cordão de solda. Na terceira etapa foi avaliada a microestrutura e a dureza dos cordões de solda. Os resultados mostraram que foi possível determinar uma faixa operacional em que a estabilidade do processo foi considerada adequada para os quatro gases de proteção utilizados. A análise qualitativa mostrou que a adição de C_3H_6 não alterou o aspecto superficial e interno dos cordões de solda. A adição de 0,4% de C_3H_6 foi positiva para o $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2$ proporcionando melhores índices de estabilidade no processo, reduzindo as quantidades de respingos e escória, gerando um pequeno aumento na taxa de deposição. Por outro lado, a adição de 0,6% de C_3H_6 ao $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ não contribuiu para a estabilidade do processo, resultando um aumento na taxa respingo e escória e uma redução da taxa de deposição. Também foi verificado que a adição de C_3H_6 não resultou em alterações na microestrutura e nos valores de dureza do metal de solda. Por fim, pode-se concluir que a adição de C_3H_6 foi benéfica para a estabilidade do processo do $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2$, e não apresentou vantagens para o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$.

Palavras-chave: GMAW; Estabilidade do processo; Gases de proteção; Propileno

ABSTRACT

This work evaluates the stability of the GMAW welding process in conventional gases Ar+12% CO₂ e Ar+25% CO₂ and with the addition of propylene fuel gas Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆. The investigation was carried out in three stages. Firstly, the weld beads were made on the surface of a plate to determine the operational parameters, which would render stability to the process. Two wire-feeding velocities were used for each protection gas composition (4m/min and 5m/min). Then, new weld beads were made with the optimal parameters selected in the previous stage. The appearance and geometry of the weld bead, stability indices, deposition rate, amount of slag and spatter occurrence were determined. In the third stage, the microstructure and hardness of the weld beads were determined. The experiments showed the range of operational parameters that promote stability for the welding process with all the compositions of protection gases tested. The addition of C₃H₆ did not alter both the surface and bulk appearance of the weld beads. The 0.4%C₃H₆ addition enhanced the stability indices of the process, slightly increasing the deposition rate and reducing spattering and the slag volume. On the other hand, the addition of 0.6%C₃H₆ to the Ar+25%CO₂ mixture reduced the deposition rate and increased the spattering and the slag volume. The addition of C₃H₆ did not affect the microstructure and hardness. It is possible to conclude that the effect of addition of C₃H₆ to the mixture of protection gases depends on the amount of propylene and the composition mixture. The addition of 0.4% propylene to a 12%CO₂ mixture was positive, while the addition of 0.6% propylene to a 25% CO₂ was negative to the stability parameters.

Key words: GMAW. Welding stability. Protection gases. Propylene.

1 INTRODUÇÃO

O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é amplamente utilizado na indústria por sua versatilidade, facilidade de automatização, flexibilidade e baixo custo. Nesse processo, o uso contínuo do arame eletrodo sólido permite um alto fator de trabalho do operador e a elevada densidade de corrente utilizada possibilita alta produtividade. Ao longo de décadas, esse processo passou por muitos desenvolvimentos no campo de pesquisas científicas, acompanhando a criação de novos consumíveis, equipamentos e condições de trabalho mais eficazes. Em razão desses aspectos, atualmente, o GMAW é um dos processos de soldagem mais utilizados na fabricação, reparo de componentes metálicos e de equipamentos (Machado, 1996; Modenesi e Marques, 2000; Marques, Modenesi e Bracarense, 2009; Planckaert *et al.*, 2010; Scotti e Ponomarev, 2014).

De acordo com a AWS (1991), o processo GMAW baseia-se na união de duas peças metálicas por meio da fusão com um arco elétrico estabelecido entre o arame eletrodo, alimentado continuamente, e a peça. O arco elétrico e a poça de fusão são protegidos da contaminação atmosférica por meio de um gás ou uma mistura proporcional de gases, adequada para cada aplicação (Villani, Modenesi e Bracarense, 2006).

O GMAW é um processo sensível às variações dos parâmetros operacionais, sendo o tipo de gás de proteção um desses fatores. A atmosfera protetora formada por esses gases afeta parâmetros importantes da soldagem, como o tipo de transferência metálica, a estabilidade do arco elétrico, a quantidade de escória e respingos gerados, características mecânicas e metalúrgicas do metal ou liga metálica, a profundidade e a geometria do cordão de solda (AWS, 1991; Modenesi, 2012). O fluxo de atmosfera protetora gasosa tem como função evitar a contaminação do arame eletrodo, das gotas de metal fundido em transferência e da poça de fusão pelos gases atmosféricos, além de influenciar a geometria do cordão de solda e a profundidade de penetração na peça. Por ser um meio ionizante, o gás protetor também tem como função estabilizar o arco elétrico, controlar a transferência metálica, o consumo do arame eletrodo e a fusão do metal de base (Scotti e Ponomarev, 2014).

As composições das misturas de gases usadas constituem uma variável importante na determinação da qualidade da solda (AWS, 1991; Marques, 1991; Machado, 1996). Isso torna viável o desenvolvimento de pesquisas no campo de

novas misturas de gases para prover demandas industriais que tragam melhorias ao processo. Contudo, atualmente, há poucos estudos usando novas formulações de gases de proteção. Efetivamente, a inovação tem ocorrido em relação aos equipamentos de soldagem, buscando controlar o processo de transferência metálica (Liskevych, 2010). Devido a esses aspectos, as pesquisas motivam o estudo do uso de gases combustíveis misturados aos gases de proteção convencionais (Suban e Tusek, 2001; Vilarinho *et al*, 2011; Tatagiba, Gonçalves e Paranhos, 2012; Tatagiba, 2015; Ribeiro, 2016; Polonine, 2018; Ferreira, 2018; Santos, 2018; Costa, 2019).

O trabalho busca estudar as variações que ocorrem na estabilidade do processo, quando o gás combustível propileno é adicionado, em baixas porcentagens, nas misturas de gases de proteção convencionais como o Ar+25%CO₂ e Ar+12%CO₂. Ribeiro (2016) em seu trabalho, utilizou misturas de gases de proteção com e sem adição de propileno na mistura de gases de proteção convencionais. Essa pesquisa indicou que a adição de percentuais abaixo de 1% de propileno contribuiu para melhorar a estabilidade do processo, sem produzir mudanças significativas nas microestruturas e conseqüentemente no cordão de solda obtido.

1.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo estudar os efeitos sobre a estabilidade do processo de soldagem GMAW nos gases de proteção convencionais Ar+12%CO₂ e Ar+25%CO₂ e com a adição do gás combustível propileno Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ utilizando aço baixo carbono e transferência metálica por curto-circuito.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar faixas operacionais de trabalho para os parâmetros de corrente e tensão com uso das misturas de gases de proteção convencionais e com a adição de propileno, de forma que o arco elétrico apresente adequada estabilidade na transferência metálica por curto-circuito;
- Realizar o monitoramento dos sinais elétricos durante o processo de soldagem para a avaliação da estabilidade do arco elétrico;
- Avaliar a geometria e a ocorrência de possíveis descontinuidades superficiais nos cordões de solda produzidos;

- Determinar a taxa de deposição, de respingos e escórias gerados durante o processo de produção dos cordões de solda;
- Identificar possíveis alterações na microestrutura e na dureza do cordão de solda, considerando as atmosferas de proteção gasosa utilizadas.

1.3 Justificativa

Dados da literatura técnica reportam que nos últimos quarenta anos não houve um crescimento nos pedidos de patentes em relação à utilização de novas misturas de gases de proteção para os processos de soldagem. As mudanças têm ocorrido de forma extensiva em relação aos equipamentos buscando controlar o processo de transferência metálica, reduzir os defeitos produzidos e melhorar as propriedades mecânicas com aumento de produtividade. De fato, o avanço da tecnologia embutida no equipamento de soldagem torna-o capaz de modular o perfil da curva de corrente, obtendo efeitos distintos que favorecem o processo (Tatagiba, Gonçalves e Paranhos, 2012).

De forma geral, o fator que influencia mais diretamente nos custos de processo são a mão-de-obra e “overhead” representando cerca de 75-80% do custo total de uma operação de soldagem. Os custos com aquisição e manutenção de equipamentos representa cerca de 5-9%, energia elétrica cerca de 3% e os consumíveis de soldagem cerca de 12-13% (Brito e Paranhos, 2005). Considerando apenas os gases de proteção utilizados comercialmente na soldagem a arco elétrico tem-se cerca de 5% do custo total do processo produtivo (Silva, 2005).

Comparando o custo dos gases de proteção com os custos totais do processo, percebe-se uma relação que justifica o pequeno investimento nas pesquisas e patentes depositadas sobre o desenvolvimento de composições de misturas de gases diferentes, assim como as poucas variações de misturas de gases catalogadas e fornecidas por empresas especializadas. Contudo, apesar das misturas de gases atuais fornecidas pelas empresas atenderem de forma satisfatória as necessidades do mercado, muitas melhorias em relação à qualidade da solda obtida, redução de custos e produtividade podem ser alcançadas com o avanço de pesquisas em formulações de misturas de gases mais eficientes para o processo.

Durante décadas, a maioria das formulações de composições das misturas de gases de proteção para soldagem GMAW de aço possui caráter levemente oxidante,

conforme normatizado pela AWS A5.32M, permanecendo como base o uso de Ar, He, CO₂ e O₂. Dessa forma, há uma tendência para a produção de gases de proteção com misturas ricas em gases inertes, com adições reguladas de elementos oxidantes, atendendo às aplicações específicas.

Estudos sobre a adição de gases combustíveis nas atmosferas de proteção pelo processo GMAW são escassos, todavia, esses gases apresentam potencial redutor devido à quantidade de energia térmica liberada durante a sua dissociação (Ribeiro, 2016). Poucos artigos foram encontrados na literatura sobre o uso de gases combustíveis não convencionais, com caráter redutor em processos de soldagem. No entanto, em aplicações específicas, adições de H₂ e C₃H₆ foram estudadas pelo grupo de pesquisa em soldas do LAMAV/UENF, tanto em caráter experimental quanto operacional. Tatagiba (2015) e Menezes (2016) mostraram que o uso de H₂ como gás de proteção, em baixo percentual, proporciona uma melhoria na estabilidade do processo. Santos (2018) estudou o efeito da adição de H₂ em gases de proteção convencionais (Ar+25%CO₂ e CO₂) na soldagem do aço. Os resultados indicaram que os gases com H₂ possuem um melhor comportamento operacional que misturas de gases convencionais.

No mesmo grupo de pesquisa, Ribeiro (2016) estudou a influência da adição de gás combustível propileno à mistura convencional de Ar+CO₂, e a CO₂ puro na soldagem com transferência por curto-circuito. Como resultado verificou que a adição de até 1%C₃H₆ às misturas Ar+12%CO₂ e Ar+25%CO₂ e adição de 2,5%C₃H₆ ao CO₂ se mostraram satisfatórias gerando soldas com bom aspecto visual, adequadas características geométricas e isentas de discontinuidades. No trabalho de Ferreira (2018) a adição de 0,4% de propileno na mistura de proteção Ar+12%CO₂, com transferência por spray, mostra que não houve mudanças significativas nos resultados obtidos, porém, foi necessário aumentar a vazão de gás para alcançar maiores tensões e atingir melhor estabilidade.

Considerando os resultados das pesquisas anteriores, busca-se aprimorar os conhecimentos produzidos pelo grupo de pesquisa com a influência da adição de baixos percentuais do gás combustível propileno com o objetivo de aumentar as referências sobre as diferentes formas de interação da mistura gasosa com o metal de base aliados aos diferentes parâmetros de processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Soldagem GMAW

Segundo a AWS - American Welding Society - (1991), a soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) é definida como um processo de união de materiais que utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre a peça e o arame eletrodo, de alimentação contínua. Possui grande importância industrial, sendo utilizados na fabricação de componentes, estruturas metálicas e na recuperação de peças.

A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo externo de gás, sem o uso de pressão. Em função da reatividade dos gases de proteção utilizados, é conhecido comercialmente como MIG/MAG (*Metal Inert Gas - Metal Active Gas*). No processo MIG a proteção da região de solda é realizada através de um gás inerte ou uma mistura de gases inertes. No processo MAG podem ser utilizados gases ativos puros ou uma mistura de gases inertes com gases ativos. De acordo com a AWS (1991) e Wainer, Brandi e Mello (1992), a soldagem MIG é adequada aos aços carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, magnésio e cobre. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços baixo carbono e aços de baixa liga.

O fluxo de atmosfera protetora gasosa tem como função evitar a contaminação do arame eletrodo, das gotas de metal fundido e da poça de fusão pelos gases atmosféricos (O_2 , H_2 e N_2), influenciar a geometria do cordão de solda e a profundidade de penetração na peça (Scotti e Ponomarev, 2014). Por ser um meio ionizante também apresenta como função estabilizar o arco elétrico, controlar a transferência metálica, o consumo do arame eletrodo e a fusão do metal de base.

São empregados como gases de proteção convencionais o argônio (Ar), o hélio (He) e o dióxido de carbono (CO_2), que podem ser usados puros ou misturados em pequenas quantidades com o oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) (Machado, 1996). Atualmente, o gás inerte mais empregado é o argônio devido a sua abrangência, eficácia e custo. No caso dos gases ativos o mais utilizado é o CO_2 .

A natureza e a composição química dos gases de proteção influencia na estabilidade do arco elétrico gerado, no modo de transferência metálica, na temperatura da poça de fusão, na profundidade de penetração, no formato do cordão de solda, nas perdas de elementos químicos, na produção de descontinuidades, na velocidade de soldagem, na produtividade e no custo final do processo. Dessa forma,

percebe-se que as composições das misturas de gases usadas no processo constituem variáveis importante na determinação da qualidade da solda (AWS, 1991; Marques, 1991 e Machado, 1996).

O processo de soldagem GMAW funciona com corrente contínua (CC), normalmente com o arame eletrodo no pólo positivo. Essa configuração é conhecida como polaridade inversa. Raramente a polaridade direta é utilizada devido a transferência deficiente do metal fundido do arame eletrodo para a peça (Scotti, Resende e Souza, 2009). A figura 1 mostra um esquema do processo de soldagem GMAW:

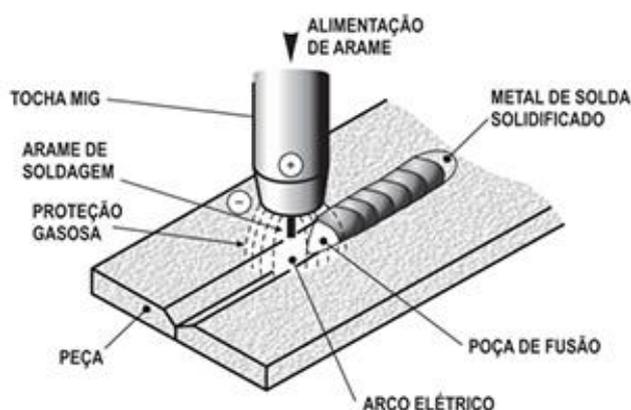
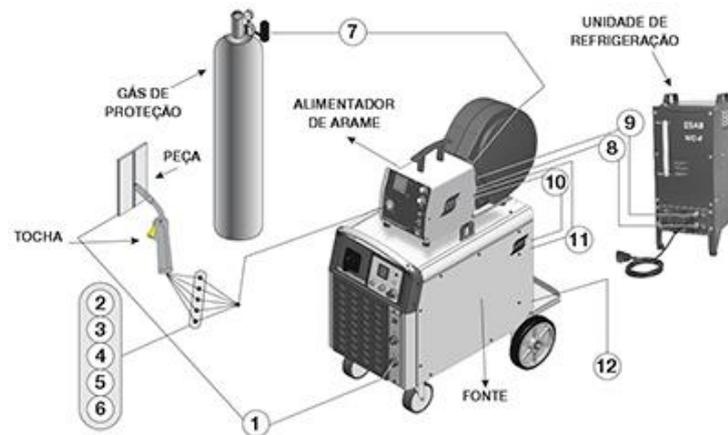


Figura 1: Esquema do processo de soldagem GMAW (Modenesi, 2012)

De acordo com Modenesi (2012) é um processo que se caracteriza por sua versatilidade, possibilidade de aplicação em todas as posições de solda (plana, horizontal, vertical e sobre-cabeça) com boa estabilidade do arco elétrico dependendo do valor da corrente usada. Machado (2013), Marques e Modenesi (2000) e Pires *et al.* (2007) relatam que esse processo é normalmente operado de forma semi-automática, quando a tocha é conduzida pelo operador. Também pode ser realizado de forma mecanizada, onde o movimento da tocha é feito por uma máquina, apresentando grande facilidade para ser robotizada. Isso se deve ao fato de produzir baixa quantidade de escória, boa homogeneidade na qualidade dos cordões podendo ser aplicada a uma ampla faixa de materiais, incluindo àqueles que têm problemas de soldabilidade.

O seu equipamento básico inclui fonte de energia, cabos, tocha de soldagem, alimentador de arame e seu sistema de controle, bobina de arame, eletrodo e fonte de gás de proteção com regulador de vazão. A figura 2 apresenta um esquema de um equipamento de soldagem pelo processo GMAW:



- | | |
|--|--|
| 1 - CABO DE SOLDA (NEGATIVO) | 7 - GÁS DE PROTEÇÃO VINDO DO CILINDRO |
| 2 - REFRIGERAÇÃO DA TOCHA (ENTRADA ÁGUA) | 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/FONTE) |
| 5 - REFRIGERAÇÃO DA TOCHA | 11 - CABO DE SOLDA (POSITIVO) |
| 6 - CONDUÍTE DO ARAME | 12 - CONEXÃO PARA A FONTE PRIMÁRIA |

Figura 2: Esquema do processo de soldagem GMAW (Modenesi, 2012).

Por trabalhar com um arame eletrodo contínuo permite o uso de elevadas densidades de corrente no eletrodo, resultando em alta taxa de deposição e como consequência, elevada produtividade. É um processo sensível a variações dos parâmetros operacionais. Nesse caso, durante a soldagem o arco elétrico pode ser afetado por alterações na corrente; tensão; velocidade de alimentação do arame; ângulo da tocha; comprimento livre do arame; distância do bico a peça; a posição de soldagem e o tipo de gás de proteção (Modenesi, 2012).

Modenesi (2012), Bracarense (2014) e Scotti e Ponomarev (2014) citam aspectos das principais características do processo GMAW que podem ser entendidos como vantagens e desvantagens do processo:

- Elevada taxa de fusão do arame eletrodo;
- Possibilidade de variação dos modos de transferência metálica;
- Soldagem pode ser executada diversas posições;
- Alimentação contínua do arame eletrodo, altas velocidades de soldagem, alta taxa de deposição do metal de solda, portanto alta produtividade;
- Baixo peso e aspectos ergonômicos da tocha;
- Alta densidade de corrente;

- Pouca produção de fumos e escória;
- Alta emissão de luz e calor;
- Dificuldade de manuseio do equipamento, regulagem dos parâmetros de soldagem, assim como o seu alto custo;
- Complexa inter-relação entre os parâmetros de soldagem, e desses parâmetros com composição química, tipos de gases de proteção, diâmetro do arame eletrodo, tipo de metal base e geometria do chanfro.

2.2. O Arco elétrico na soldagem GMAW

A expressão “soldagem a arco elétrico” se aplica a um grande número de processos de soldagem que utilizam o arco elétrico como fonte de calor para a fusão localizada do metal base. O arco elétrico pode ser definido como um feixe de descargas elétricas entre a ponta de um eletrodo para a soldagem e o metal de base submetidos a uma diferença de potencial, sendo mantido por meio de um gás ionizado (Plankaert *et al.*, 2010).

Como os gases de proteção não conduzem eletricidade em condições atmosféricas normais, é necessário que ocorra ionização sob condições favoráveis (alta temperatura, baixa pressão ou campo elétrico de alta intensidade) para gerar o plasma, que é condutor (Scotti e Ponomarev, 2014). Os gases podem se ionizar quando seus átomos recebem uma quantidade de energia e os elétrons localizados em determinadas órbitas são forçados a ocupar órbitas de maior energia. Dependendo da quantidade de energia que o elétron recebe, pode tornar-se um elétron livre saindo da influência do campo eletromagnético do átomo.

A energia necessária para a produção de um elétron livre é chamada de potencial de ionização (Wainer, Brandi e Mello, 1992). Segundo os autores, a ionização termoiônica que ocorre no arco elétrico da soldagem, ou seja, a ionização por colisão de partículas (íons e elétrons) muito aquecidas, forma consequentemente, um meio condutor de eletricidade que representa o quarto estado da matéria, o plasma. Scotti e Ponomarev (2014) explicam que o plasma dos arcos de soldagem possui um equilíbrio de cargas e é formado pelos gases de proteção e pelos vapores metálicos provenientes do arame sólido e o metal de base.

Para a abertura do arco elétrico deve haver aquecimento e bombardeamento com elétrons do gás de proteção que envolve o eletrodo. A fonte de energia deve

possuir uma diferença de potencial (tensão em vazio). Quando o eletrodo toca o metal, a tensão cai para um valor próximo de zero e por efeito joule, a região do eletrodo fica incandescente favorecendo a emissão termoiônica. O sistema ganha mais energia térmica por meio dos elétrons emitidos, promovendo a ionização térmica do gás de proteção e do vapor metálico entre o eletrodo e o metal base. Após essa etapa, o eletrodo pode ser afastado do metal base, sem que o arco elétrico seja extinto (Scotti e Ponomarev, 2014; Wainer, Brandi e Mello, 1992).

Com a passagem de corrente, a diferença de potencial ao longo de um arco elétrico não é uniforme. Conforme dito anteriormente, a tensão cai para valor próximo de zero quando o arame eletrodo toca o metal base. Nesse sentido, existem quedas abruptas de tensão junto aos eletrodos (anodo e catodo) resultando na divisão do arco elétrico em três regiões, cada uma com suas características e funções (Wainer, Brandi e Mello, 1992): regiões de queda catódica, queda anódica e coluna de plasma. A figura 3 mostra, em sentido longitudinal as três regiões:

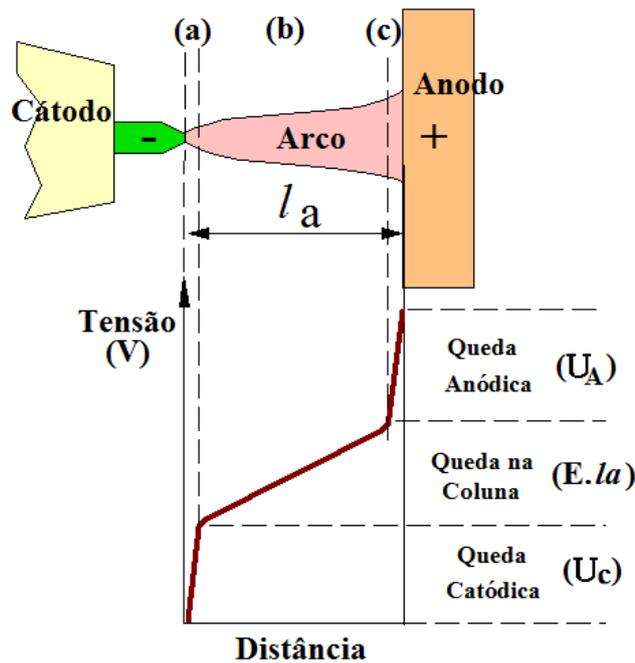


Figura 3: Distribuição de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica, (b) Coluna do Arco e (c) Zona de Queda Anódica (Modenesi, 2012).

Não há uma transição bem definida entre as regiões. As principais características destas regiões estão descritas nos subtítulos abaixo.

2.2.1 Região catódica

A região de queda catódica é a mais próxima do eletrodo consumível e apesar de ter um volume desprezível em comparação com a coluna de plasma, é fundamental para a existência do arco elétrico. A coluna do arco é constituído de elétrons e íons positivos e negativos e certa quantidade de átomos neutros. Contudo os elétrons apresentam uma alta mobilidade devido à sua massa muito menor, logo, a emissão de elétrons pelo catodo é importante pois estes conduzem mais de 90% da corrente elétrica através do arco. Os elétrons são emitidos e acelerados para a região anódica através de campos elétricos, aquecendo-o e favorecendo a emissão de mais elétrons livres. A região é aquecida pela ação dos íons incidentes através da energia cinética entregue na colisão destes com o catodo (Silva *et al.*, 2007).

A queda de tensão nessa região é maior do que na região anódica e varia entre 5 e 20 V para eletrodos consumíveis (Scotti e Ponomarev, 2014; Modenesi, 2012). A capacidade do catodo em emitir elétrons depende da função de trabalho e temperatura deste. O pequeno volume da região catódica e os elevados gradientes térmico e elétrico tornam muito difícil o seu estudo. Caracteriza-se por um estado muito afastado do equilíbrio, sendo uma transição entre a coluna do arco e o eletrodo, não ocorrendo condições para o estabelecimento de equilíbrio tanto térmico (mesma energia cinética média de seus diversos constituintes) como elétrico (balanço de cargas elétricas), ao contrário do que parece ocorrer na coluna do plasma a uma atmosfera de pressão (Modenesi, 2012).

O comprimento da queda de tensão catódica é um valor de ordem de grandeza do caminho médio livre dos elétrons e varia entre 10^{-3} a 10^{-5} V/cm, o que torna difícil seus estudos (Wainer, Brandi e Mello, 1992). Segundo eles, estima-se que seu valor seja da ordem de 29.000 V/cm para o cobre na pressão de 1 atm.

2.2.2 Região anódica

Trata-se de uma região bombardeada pelos elétrons emitidos pelo anodo. A queda nessa região está entre 2 a 8 V, sendo mais comum valores entre 1 e 4 V para condições de soldagem (Scotti e Ponomarev, 2014). É uma região essencial para a continuidade do arco, sendo fundamental para a manutenção do arco elétrico, não é tão importante como a região catódica.

Como o catodo emite elétrons, o ânodo não emite íons, estes são gerados pela ionização dos átomos na coluna do arco. Elétrons oriundos do catodo, atravessam a coluna do arco e entregam energia cinética ao anodo, sendo responsável pelo seu aquecimento e um acúmulo de elétrons nessa região que geram uma queda de tensão (Modenesi, 2012; Silva et al., 2007). A queda anódica depende de vários fatores, tendendo reduzir com a temperatura do anodo e a aumentar com a sua condutividade térmica (Modenesi, 2012).

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), o comprimento da queda de tensão anódica é da ordem de 10^{-2} cm e estima-se que ele varie de 1 a 25 V/cm, sendo no mínimo igual ao potencial de ionização do gás de proteção.

2.2.3 Coluna de plasma

A coluna do arco é constituída por elétrons livres, íons (positivos e negativos) e uma pequena quantidade de átomos neutros. Segundo Marques *et al.* (2011) trata-se da região visível e luminosa do arco. Em termos de volume, o arco elétrico é formado basicamente pela coluna de plasma, que apresenta normalmente entre 1 a 10 mm, enquanto as regiões arco-eletrodo e arco-peça possuem um comprimento da ordem de 10^{-3} mm na região anódica e 10^{-4} mm na região catódica.

Para a formação do plasma, o gás do arco deve ser aquecido a temperaturas elevadas e, como resultado da agitação térmica, irá ocorrer choques entre os seus constituintes e, assim, a sua ionização (Scotti e Ponomarev, 2014). Com o aumento da temperatura do gás, a energia de suas moléculas aumenta, devido ao movimento de translação e vibração das moléculas. Nesse caso, a energia vibracional de moléculas poliatômicas torna-se suficiente para causar a sua ruptura ou dissociação em átomo. A ionização ocorrerá em temperaturas ainda maiores, onde um elétron das camadas mais externas pode ser expulso dos átomos quando estes se chocam em grande velocidade (Modenesi, 2012; Scotti e Ponomarev, 2014).

A queda de tensão da coluna é pequena, de alguns poucos volts. Scotti e Ponomarev (2014) ressaltam que 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.

A coluna do arco atinge temperaturas muito elevadas. Estudos determinaram as temperaturas por métodos espectroscópicos e ficam em torno de 6.500 K na

soldagem com eletrodos revestidos e atingem até 10.000 a 30.000 K na soldagem GTAW, GMAW e plasma. A figura 4 ilustra a distribuição de temperatura no arco GTAW, indicando temperatura de até 18.000 K para regiões do arco próximas do eletrodo. Essas temperaturas variam de acordo com as condições operacionais, tendendo a aumentar para maiores valores de correntes de soldagem. Compare esta figura com a anterior e estime, para diferentes regiões do arco, o grau de ionização do argônio (Modenesi, 2012).

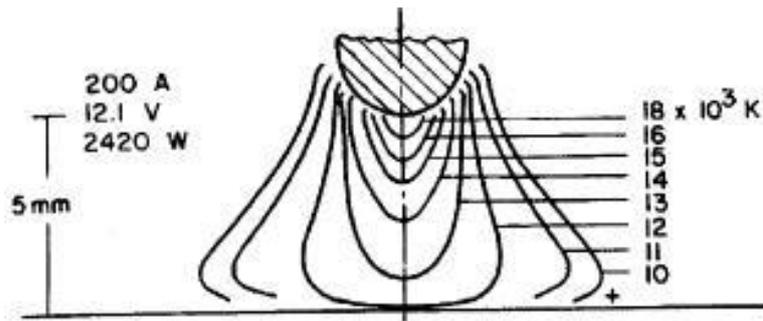


Figura 4: Isotermas no arco GTAW em argônio (Modenesi, 2012).

2.2.4 Emissão catódica

Na soldagem GMAW, com eletrodo consumível, considera-se que os elétrons são emitidos de acordo com o fenômeno denominado de emissão catódica ou emissão por campo. É o método mais aceito para explicar a emissão de elétrons nesse processo de soldagem. Caracteriza-se pela formação de um filme com espessura microscópica de óxido sobre a superfície do catodo fornecendo condições favoráveis para a emissão de elétron (Scotti e Ponomarev, 2014). Esta fina camada de óxido é formada devido a interação dos metais com o meio à sua volta quando este possui agentes oxidantes, tais como oxigênio e vapor d'água (Gentil, 1996).

De forma detalhada, pode-se dizer que a movimentação das cargas elétricas no arco provoca a ocorrência de choques entre as cargas de íons positivos e negativos, átomos neutros gerados na fusão do eletrodo, entre íons e gotas que atravessam o arco, resultando em calor (Wainer, Brandi e Mello, 1992). O alto gradiente de tensão localizado, criado entre camadas de óxidos, formadas sobre a poça de fusão e o metal base, proporciona condições favoráveis para que os elétrons se associem e se direcionem para a região anódica (Scotti e Ponomarev, 2014). Isto ocorre mesmo com baixa tensão aplicada entre o eletrodo e a chapa. Com esta aceleração os elétrons removem a camada de óxido localmente (quebrando-a/ou

fundindo-a), atravessam-na nestes pontos e seguem pela coluna de plasma até o anodo. A figura 5 mostra o esquema dos fenômenos descritos.

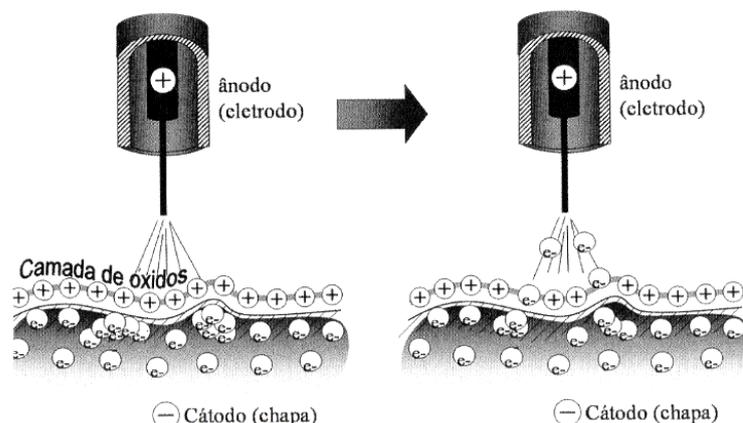


Figura 5: Representação esquemática do mecanismo de emissão catódica (Scotti e Ponomarev, 2014).

Para evitar instabilidade do arco, ou seja, que o arco elétrico procure por óxidos em regiões muito distantes, há a necessidade da regeneração da camada de óxido quebrada. Dessa forma, gases com caráter oxidantes (O_2 e/ou CO_2) são adicionados na mistura do gás proteção para soldagem de aços com baixa facilidade de oxidação. Uma atmosfera oxidante é fundamental para que ocorra a regeneração da camada de óxido, dessa forma, gases inertes puros (Ar ou He) não devem ser utilizados para a proteção desses aços. No caso de metais altamente reativos essa atmosfera protetora oxidante não se faz necessária.

2.3 Transferência metálica

O estudo dos fenômenos que envolvem a transferência metálica é importante para a melhor compreensão do processo de soldagem, obtenção de cordões de solda com mínimo de defeitos, redução da quantidade de respingos e fumos, prever a penetração do passe, avaliar a quantidade de calor transferida para o metal e controlar as distorções da estrutura soldada (Wainer, Brandi e Mello, 1992).

Muitas técnicas podem ser utilizadas para o estudo da transferência metálica. As técnicas mais usuais podem ser classificadas em três categorias: métodos mecânicos, fotográficos e através da medição de efeitos secundários (Modenesi, 2009).

Os métodos mecânicos consistem no recolhimento das gotas de metal de adição. Este método é muitas vezes questionado devido à dificuldade de se garantir que as gotas de metal não se aglutinem antes de solidificar. Os métodos fotográficos (cinematografia) é umas das técnicas mais adequadas para observação da transferência do metal. Com câmeras de alta potência utilizam imagens obtidas em alta velocidade para observar os rápidos processos que ocorrem durante a transferência metálica. Técnicas auxiliares com filtros e lasers especiais podem ser usadas para reduzir o ofuscamento causado pelo arco elétrico. De acordo com Modenesi (2009), os métodos indiretos baseiam-se em aferições e análises de sinais relativos ao processo de transferência como corrente, tensão, luminosidade e emissão acústica. O estudo das formas de transferência do metal de solda pode ser correlacionado com a estabilidade do processo. Silva *et al.* (2008) ressalta que a estabilidade ocorre quando se obtém uma solda com regularidade na transferência metálica, produzindo um mínimo de respingos, e também geometricamente homogênea em toda a extensão do cordão.

A transferência de metal é a maneira pela qual o material é transferido da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão, gerando forte influência no processo GMAW em termos de estabilidade, produção de respingos, formato do cordão, posição de soldagem, capacidade de fundir o metal de base e qualidade da solda (AWS, 1981; Norrish, 1992). Segundo estudos realizados por Kim e Eagar (1993), as variáveis que determinam o modo de transferência metálica são: a corrente de soldagem, a composição do gás de proteção, o comprimento do eletrodo, a polaridade, o material que será soldado, entre outros fatores que podem afetar a transferência, como, por exemplo, os contaminantes ambientais. No entanto, a corrente de soldagem é o fator que define o tipo de transferência. Norrish (1992) afirma que desde o desenvolvimento do processo de soldagem GMAW muitos estudos mostram que cada processo de transferência metálica influencia diretamente na penetração, estabilidade do processo, morfologia do cordão, geração de respingos, formação de porosidade e nível de aprisionamento de gás.

Dependendo dos parâmetros de soldagem escolhidos e do tipo de gás de proteção, a transferência metálica nas soldagens GMAW pode assumir três formas principais: transferência por curto-circuito (short arc), transferência globular e a transferência por “spray” (aerossol ou goticular). Na transferência por curto-circuito o arco se estabelece e se interrompe a uma frequência determinada. Este tipo de

transferência se caracteriza por apresentar grandes gotas de metal fundido. Na transferência por “spray” o metal fundido é transferido à poça de fusão sem interrupção do arco e em pequenas gotas. Na transferência globular coexistem as transferências por curto-circuito e “spray” (Scotti e Ponomarev, 2014; Modenesi, 2012).

A figura 6 abaixo mostra os modos de transferência metálica, de acordo com os níveis de tensão. Pode-se observar os campos operacionais das formas de transferência metálica, em função da corrente e da tensão na soldagem GMAW com eletrodo positivo e um gás de proteção tendo como base o argônio. A transferência por curto-circuito é estável para baixos valores de tensão em ampla faixa de corrente. A transferência spray se dá para maiores valores de tensão e corrente. A transferência globular ocorre para valores de corrente mais baixas e maiores de tensão.

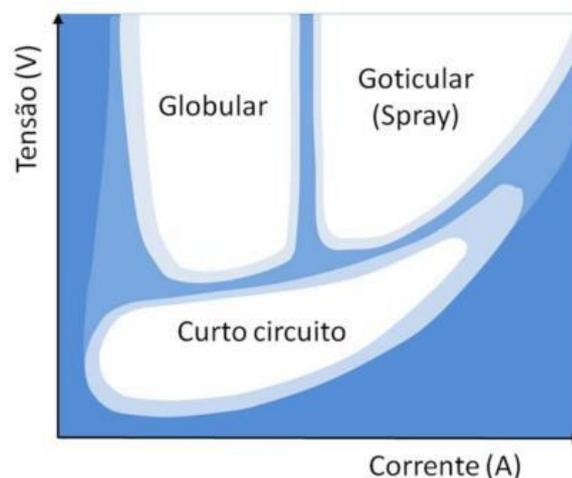


Figura 6: Esquema dos tipos de transferência metálica em GMAW (Modenesi e Bracarense, 2011).

2.3.1 Forças atuantes na transferência metálica

Entre as teorias existentes, o modelo conhecido como Equilíbrio de Forças Estáticas e a Instabilidade de *Pinch* consiste na explicação de que a transferência metálica é governada por uma série de forças que podem atuar favorecendo ou não o seu destacamento. As principais forças estáticas que agem sobre a gota são: força gravitacional (F_g), força eletromagnética (F_{em}), força devido à tensão superficial do metal fundido (F_γ), força de arraste dos gases (F_a) e força de vaporização (F_v). Quando o somatório de forças de destacamento supera o somatório das forças de retenção, a

gota é transferida (Scotti e Ponomarev, 2014). A figura 7 mostra as forças atuantes sobre a gota durante seu destacamento:

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v$$

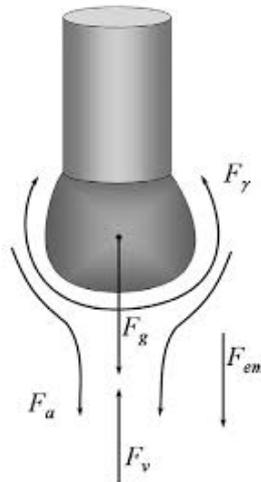


Figura 7: Forças estáticas atuantes na transferência metálica (Scotti e Ponomarev, 2014).

Segundo Scotti e Ponomarev (2014), esse mecanismo de destacamento das gotas pode se alterar com a mudança do valor da tensão, definido como corrente de transição. De acordo com a literatura (Scotti e Ponomarev, 2014; Kim e Eagar, 1993; Norrish, 1992; Modenesi, 2012; Wainer, Brandi e Mello, 1992), à partir de determinada corrente de transição o mecanismo que passa a predominar na transferência da gota metálica é denominado de *Instabilidade Pinch*. O efeito *Pinch* ocorre quando a fusão do eletrodo se inicia e a poça de metal líquido se forma, a ponta do arame penetra no banho de fusão causando um curto-circuito. Quando o efeito *Pinch* supera o efeito da tensão superficial, a coluna se rompe e uma pequena gota residual se forma, sendo esta posteriormente transferida para a poça de solda. Nesse caso, o efeito das outras forças serão desprezíveis (Scotti e Ponomarev, 2014). No entanto, os autores ressaltam que nenhum dos dois modelos são comprovados na prática, tanto por poder existir mais forças desconhecidas atuando concorrentemente como pela própria deficiência em se modelar o comportamento real de cada uma das forças identificadas.

2.3.1.1 Força gravitacional (F_g)

A força gravitacional representa a massa da gota multiplicada pela aceleração da gravidade (g), portanto é influenciada pela dimensão e densidade da gota. Dependendo da posição de soldagem, esta força pode favorecer ou dificultar a transferência de metal, no entanto, essa força continua agindo na solda mesmo após o destacamento (Scotti e Ponomarev, 2014). Considerando somente a componente desta força paralela ao eixo do arame, assumindo a gota como uma esfera, tem-se a equação 1:

$$F_g = \frac{\pi}{6} d^3 \rho g \quad (1)$$

Onde: d = diâmetro da gota; ρ = densidade do metal líquido; g = aceleração da gravidade.

2.3.1.2 Força associada a tensão superficial (F_y)

A força resultante no interior sobre cada átomo é nula, mas na superfície a resultante da atração tem sentido voltado para o interior. Isso ocorre porque a densidade molecular é maior dentro de um líquido do que num gás ou plasma. A força devido à tensão superficial age de forma contrária ao destacamento, mantendo a gota na ponta do eletrodo. Quanto maior for o diâmetro da gota, maior será a tensão superficial. Dessa forma podemos afirmar que a tensão superficial de um material em um determinado meio é proporcional a energia livre superficial (Scotti e Ponomarev, 2014). Ogino e Hirata (2015) afirmam que a tensão superficial é a força principal atuante na retenção da gota na ponta do arame-eletrodo e é independente da corrente de soldagem pois é determinada de acordo com o formato da gota.

A diferença dessa energia dá origem a tensão superficial, que pode ser expressa pela equação 2:

$$F_y = 2\pi r \gamma \quad (2)$$

Onde:
 r = raio da gota e γ = energia livre da superfície

2.3.1.3 Força eletromagnética (F_{em})

As forças eletromagnéticas são chamadas de Forças de Lorentz, sendo a resultante de um conjunto de forças radiais induzidas pelo campos magnético. Para condutores sólidos o efeito dessas forças pode ser desprezado, porém, para condutor e líquidos, como a gota metálica, cada unidade de volume é submetido a força eletromagnética. Sob compressão, essa força tentar deslocar o material no sentido da superfície para o centro do condutor. Nessa condição a gota assume um formato cilíndrico, pois tende a alongar-se em direção oposta ao eletrodo (Scotti e Ponomarev, 2014). A força eletromagnética pode ser obtida pela equação 3:

$$F_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 R^2} \left(\frac{1-r^2}{R^2} \right) \quad (3)$$

Onde:

μ = permeabilidade magnética do material; I = intensidade de corrente; R = raio da gota; r = posição plana de medição da gota.

De acordo com a expressão acima, conclui-se que a pressão na gota metálica devido a força eletromagnética é devido a permeabilidade magnética do material do eletrodo, a corrente de soldagem, o raio da gota e a posição e plano em que está sendo feita a medição.

2.3.1.4 Força de arraste

A força de arraste tem origem pelo jato de plasma em contato com a gota metálica. É dependente da dimensão da gota, de densidade e da velocidade do jato de plasma, assim como do coeficiente de arraste do sistema. De acordo com questões aerodinâmicas, depressões são geradas sob a gota (vórtices) e fazem com que esta seja sugada e arrastada pelo fluxo de proteção. A figura 8 ilustra o fenômeno de geração de força de arraste pelo fluxo do gás ao longo da gota, antes e após seu deslocamento:

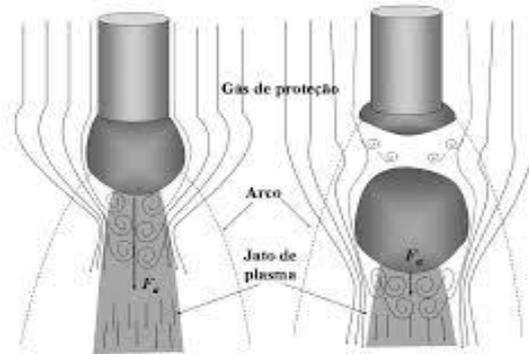


Figura 8: Geração de força de arraste pelo fluxo do gás ao longo da gota, antes e após seu deslocamento (Scotti e Ponomarev, 2014).

Após o destacamento da gota, a força de arraste continua agindo, pois a velocidade do jato de plasma é sempre maior do que a gota em transporte. Em baixas correntes, quando o tamanho da gota é maior e a velocidade do jato de plasma é menor, a força de arraste passa a ter mais significância na transferência do metal. Apesar de colaborar para o destacamento, a força de arraste é desprezível em comparação com as demais forças (Scotti e Ponomarev, 2014). A força de arraste é expressa pela seguinte equação 4:

$$F_a = \frac{1}{2} \pi v^2 \rho_g r^2 C_a \quad (4)$$

Onde:

r = raio da gota; v = velocidade do gás; ρ_g = densidade do gás; C_a = coeficiente de arraste.

2.3.1.5 Força de vaporização

A força de reação ocorre por causa da vaporização metálica do arame-eletrodo na região do acoplamento do arco com a gota, ocasionando a aceleração térmica das partículas na coluna de plasma. Devido às elevadas temperaturas, essa aceleração térmica das partículas provoca uma força que se opõe ao destacamento da gota para a poça de fusão. A reação ocorre sobre a gota e sempre atua no sentido contrário do destacamento da gota. Para altos valores de corrente e, particularmente, na presença de elementos de elevada pressão de vapor no consumível, a vaporização destes elementos pelo arco pode gerar um jato que exerce uma força de reação sobre a gota

de metal de adição. Adicionalmente, quando a raiz do arco fica restrita a uma pequena área sob a gota de metal de adição, essa também pode gerar forças de reação na gota (Scotti e Ponomarev, 2014).

Caso o acoplamento do arco fique restrito a uma pequena área sob a gota, a força poderá desviar a gota de sua trajetória normal repulsando-a e facilitando a geração de respingos (Modenesi, 2012; Scotti e Ponomarev, 2014).

$$F_v = \frac{m_o}{F_v} IJ \quad (5)$$

Onde:

m_o = massa vaporizada; ρ_v = densidade de vapor; I = intensidade de corrente; J = densidade de corrente.

2.3.2 Transferência por curto-circuito

Na soldagem GMAW a transferência metálica por curto-circuito ocorre geralmente com tensões de soldagem baixas e em correntes não muito elevadas respectivamente de 15 a 22 V e 30-200 A. A baixa tensão tem-se um arco de comprimento curto, que possibilita o contato com a poça de fusão do metal líquido na ponta do eletrodo antes que ocorra o destacamento. Caracteriza-se pelo toque periódico da gota na poça de fusão com a formação de uma ponte entre o eletrodo e o metal de base, determinando o curto-circuito. Durante o curto-circuito a tensão entre o eletrodo e metal base diminui para valores próximos a zero e a corrente tende a aumentar rapidamente, causando uma maior fusão do eletrodo por efeito joule e. Periodicamente o curto-circuito é interrompido, ou seja, o arco se extingue, a gota é destacada devido à ação da tensão superficial e da força “*pinch*” (força de constrição de origem eletromagnética causada pela passagem de corrente). A forma com que pode ocorrer esta interrupção, ou seja, mais ou menos abrupta, leva a vaporização de parte do material entre o eletrodo e a poça de fusão e a formação de respingos. Depois que a gota é transferida, o arco é restabelecido (Costa *et al.*, 2009; Scotti e Ponomarev, 2014).

A figura 9 mostra esquema do oscilograma de corrente e tensão associado com o período de transferência por curto-circuito.

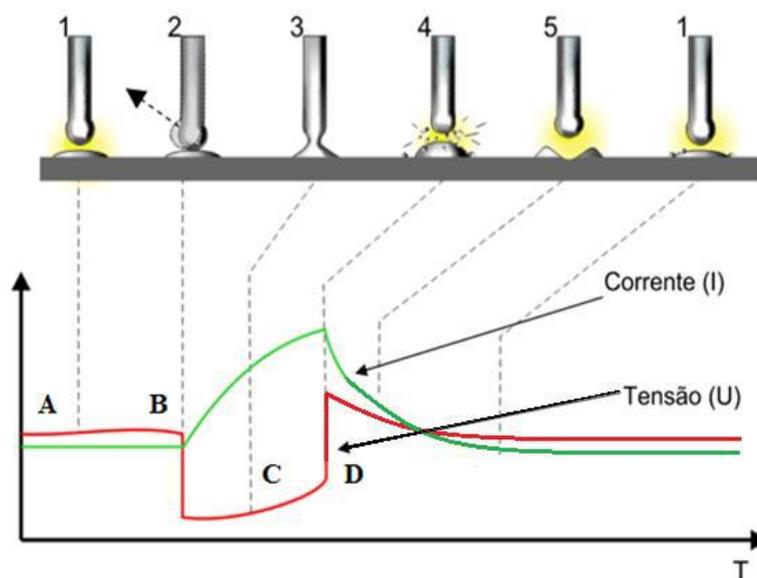


Figura 9: Esquema da transferência por curto-circuito (Modenesi, 2009 adaptado por Silva, 2005).

A figura 9 foi dividida em cinco etapas e o oscilograma de corrente e tensão em quatro períodos. Na primeira etapa (1), a gota de metal fundido começa a se formar na ponta do eletrodo, e o arco existe no período A-B. O comprimento do arco diminui à medida que a gota é formada. Na segunda etapa (2) a gota toca a poça de fusão e tem-se uma queda brusca da tensão, enquanto a corrente começa a aumentar, onde ocorre o curto-circuito, e o arco é extinto no período C. Na terceira etapa (3) o metal é transferido para a poça de fusão pela ação das forças eletromagnéticas produzidas pelo aumento da corrente (efeito *Pinch*) e pela ação da tensão superficial da poça. Na quarta etapa (4) há o rompimento da ponte metálica com o fim do curto-circuito; o arco é reaberto e a tensão sobe mostrando um pico de re-ignição (D). Na última etapa (5) há uma queda dos níveis de tensão e corrente, e uma nova gota começa a se formar na ponta do eletrodo, e o ciclo é reiniciado (Modenesi, 2009).

Percebe-se que não há arco elétrico no momento em que ocorre o curto-circuito, sendo o metal fundido transferido devido à tensão superficial. Esse modo de transferência produz uma poça de fusão relativamente pequena, de solidificação rápida e, portanto, indicado para soldagem de seções finas em todas as posições (Machado, 1996).

Em condições normais de operação com a transferência por curto-circuito, ocorrem aproximadamente de 20 a 200 curtos por segundo, dependendo das condições de soldagem. O período de curto-circuito varia com o valor da tensão de

soldagem. Modenesi e Avelar (1999) consideram uma condição de melhor estabilidade de transferência metálica quando o período de curto-circuito for mínimo dentro de uma faixa de trabalho.

A distância de bico de contato-peça (DBCP) é considerada uma variável de soldagem do processo GMAW, a sua variação pode gerar alterações significativas tanto na corrente média quanto na frequência de transferência metálica, principalmente no modo curto-circuito. Esta variação afeta tanto o comprimento do eletrodo (“stick-out”) quanto o comprimento de arco, fatores estes que têm influência no consumo e na corrente, respectivamente.

Na transferência por curto-circuito, apesar do metal não ser transferido em arco aberto (somente pelo curto-circuito), a composição do gás é capaz de afetar a duração do curto e o tamanho da gota, alterando sua estabilidade. A estabilidade do arco geralmente é melhorada pela utilização de gás de proteção com baixo potencial de ionização. Altas temperaturas mantêm a ionização do arco dentro de um núcleo. Este núcleo é afetado pela condutividade térmica do gás, de modo que quanto maior essa condutividade, menor o diâmetro do núcleo, resultando em maior tensão e menor estabilidade.

Apesar da transferência metálica ser um processo muito dinâmico, a formação de respingos passa a ser um grande problema durante a transferência em condições de instabilidade. Segundo Modenesi e Avelar (1999) há três causas distintas para instabilidade: curtos-circuitos instantâneos, falhas no processo de re-ignição do arco e variações indevidas na taxa de alimentação do arame.

A transferência por curto-circuito é comumente utilizada para a soldagem de chapas finas e pode ser utilizado em todas as posições devido à baixa quantidade de calor fornecido para a peça. Contudo, atualmente, vem se utilizando este tipo de transferência para a soldagem do passe de raiz, em chapas mais grossas e tubulações mais espessas (Nadzam *et al.*, 2011).

2.3.3 Transferência globular

Na transferência globular tensões de arco moderadas a altas, dessa forma, formam-se arcos longos evitando transferência por curto-circuito. Nesse caso, a utiliza-se correntes baixas, onde as forças eletromagnéticas não são significativas. É caracterizada pela formação de gotas de metal líquido na ponta do eletrodo (com

diâmetro superior ao diâmetro do eletrodo), que são transferidas com baixa frequência, pela ação da gravidade, para poça de fusão a uma baixa frequência, de 1 a 10 gotas/segundo (Scotti e Ponomarev, 2014).

O metal líquido forma-se na ponta do eletrodo e mantém-se preso a este por ação da tensão superficial e de vaporização. Com o aumento do volume da gota, o seu peso aumenta e, em menor escala, a força eletromagnética e a força de arraste superam as forças contrárias a transferência causando o destacamento por ação da gravidade (Figura 10). Como a força gravitacional é predominante nesse tipo de transferência, a soldagem limita-se à posição plana.

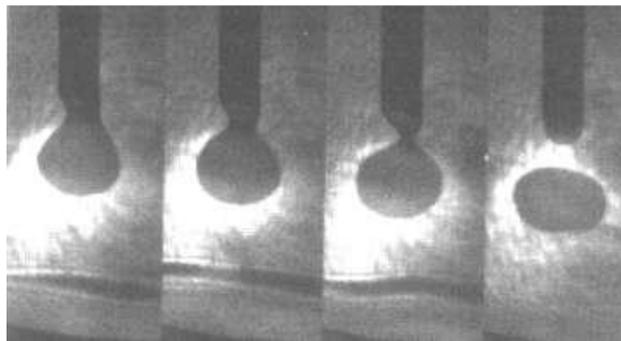


Figura 10: Imagens de filmagem de alta velocidade) na soldagem com transferência globular (Jones *et al.*, 1998).

Este comportamento descrito acima justifica a baixa taxa de transferência, enquanto a baixa corrente impede de alcançar uma alta taxa de deposição do arame. O oscilograma típico deste modo de transferência é mostrado na figura 11.

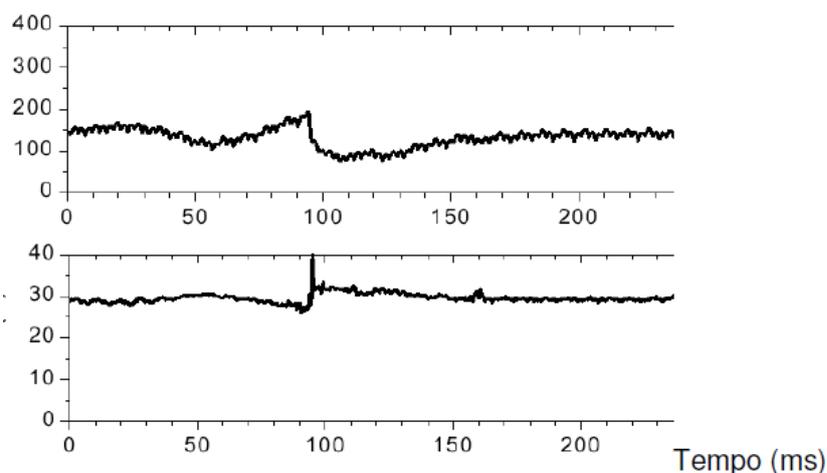


Figura 11: Oscilograma da transferência globular (Modenesi, 2009).

2.3.4 Transferência por spray

De acordo com Costa *et al.* (2009), a transferência metálica por spray ocorre em altos valores de corrente e tensão, com elevada estabilidade do arco elétrico e baixo nível de respingos. Consiste numa transferência sequencial e em alta frequência de gotas com diâmetro inferior ao do eletrodo. Modenesi e Nixon (1994) ressaltam que para que a transferência ocorra é necessário que a corrente atinja um valor crítico denominado corrente de transição, de forma que diminua o diâmetro das gotas de metal que se transferem para a peça. A partir da corrente de transição, a transferência metálica deixa de ser globular e passa a ser por spray. A corrente de transição depende de inúmeros fatores como a composição e o diâmetro do eletrodo além do seu comprimento energizado e do tipo de gás de proteção (Kim e Eagar, 1993; Scotti e Ponomarev, 2014; Resende *et al.*, 2009; Ferraresi *et al.*, 2003; AWS, 2004).

A transferência por spray ocorre usualmente de forma muito estável, com mínimas perturbações do arco. Isso pode ser observado através da falta de alterações significativas nos sinais apresentados em seu oscilograma (Scotti *et al.*, 2012). Na figura 12 pode ser observado um oscilograma e quadros de uma transferência globular com gás de proteção Ar + 2% CO₂ e arame de aço carbono de $\varnothing = 1,2$ mm:

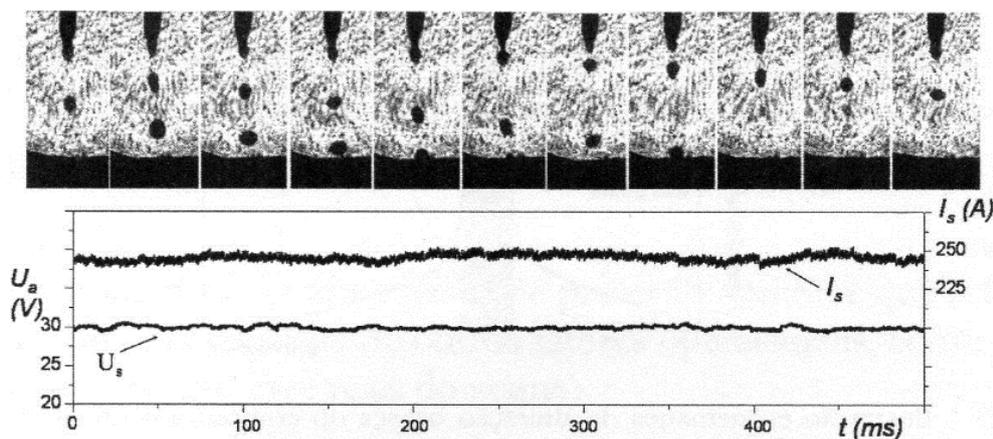


Figura 12: Oscilograma típico da transferência goticular (Scotti e Ponomarev, 2014).

A transferência spray apresenta excelentes características operacionais, porém, os altos valores de corrente limitam seu uso para chapas com maior espessura e aplicação em posição plana.

2.4 Estabilidade do processo

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).

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

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

A 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).

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

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 regulagem 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 aos seguintes 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 re-ignição do arco e variação na velocidade de alimentação de arame.

De acordo com Dutra (1995), a estabilidade de processos de soldagem realizados com diferentes combinações de parâmetros pode ser comparada, quantitativamente, através de análises estatísticas dos valores instantâneos de corrente e tensão (oscilogramas). Uma repetitividade temporal desses valores indica que a formação e o destacamento das gotas ocorreram de forma regular, que, segundo este autor, traduz-se como regularidade.

2.4.1 Indicadores de estabilidade

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. Os autores 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.

Avaliando a influência de pequenas variações no arame na estabilidade do processo, Modenesi e Avelar (1999) obtiveram em seus resultados uma indicação de que a estabilidade elétrica do processo e a quantidade respingo gerada possuem um comportamento similar em relação a tensão de soldagem. Assim, em uma tentativa de representa-los simultaneamente, definiram um Índice de Estabilidade (IE) do processo conforme a equação 6.

$$IE = \frac{100}{T \times R} \quad (6)$$

Onde:

T = período de transferência; R = fator de respingos, definido como a razão entre o peso dos respingos coletados e o peso do metal de adição (metal depositado + respingos).

Dutra (1989) propõe um critério de estabilidade baseado na regularidade dos oscilogramas, que é demonstrada de forma estatística através dos histogramas. Os histogramas são gerados através do agrupamento (faixas) das grandezas de picos de corrente, períodos de transferência e tempos de curto-circuito, o que possibilita o estudo da repetitividade dos fenômenos da transferência metálica. Constatou-se que os desvios padrão dessas grandezas constituem um bom indicativo da estabilidade do processo.

A relação entre os respingos gerados e os sinais elétricos adquiridos também foram utilizados como indicadores de estabilidade. A quantidade de respingos é estimada por um índice baseado em regressões lineares e não lineares, tendo como fatores de entrada onze variáveis derivadas dos oscilogramas (Kang e Rhee, 2001).

Dutra (2008) avalia o efeito da indutância na estabilidade do processo de acordo com o gás de proteção utilizado. Souza et al. (2011) além de verificar o efeito na indutância, também levou em consideração a influência da variação da distância bico de contato-peça e do comprimento do arco elétrico para três diferentes gases.

Em seu trabalho sobre um critério para determinar a regulação da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito, Rezende et al. (2011) mostra, com um levantamento de trabalhos científicos, que na maioria dos casos utiliza-se a regularidade dos componentes dos oscilogramas ou a relação entre os sentimentos do soldador e alguns modelos que estimam o comportamento operacional do processo GMAW, entretanto nenhum deles considera simultaneamente a estabilidade do arco e a regularidade da transferência metálica.

Com base 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:

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 7:

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{cc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{t_{ab}}}{t_{ab}} \quad (7)$$

Onde:

$\sigma_{t_{cc}}$ = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito; $\sigma_{t_{ab}}$ = desvio padrão da média do tempo de arco aberto; t_{cc} = média do tempo de curto-circuito, t_{ab} = média do tempo de arco aberto

2) Faixa admissível de tamanho da gota em transferência por curto-circuito: define uma faixa de valores que o volume da gota em transferência deve ter para que ocorra uma transferência adequada para a poça de fusão, sendo a transferência controlada pela tensão superficial. Uma gota não deve crescer demasiadamente antes de se destacar, assim como deve possuir um volume mínimo. Porém, medir o tamanho médio da gota requer equipamentos especiais, estima-se o mesmo através do cálculo da faixa admissível de frequência de curto-circuito, F_{cc} (só de curtos com transferência, removendo-se os curtos incipientes), conforme a equação 8. O volume adequado de cada gota (ϕ_g) depende do material do arame-eletrodo, gás de proteção e posição de soldagem (Liskevych e Scotti, 2010; Scotti e Ponomarev, 2014; Rezende et al.,2011).

$$F_{cc} = \frac{V_{alim}(d^2)}{\phi_g^3} \quad (8)$$

Onde:

F_{cc} = frequência de curtos-circuitos para o valor máximo e mínimo de ϕ_g ; V_{alim} = velocidade de alimentação de arame; d = diâmetro do arame; ϕ_g = valores máximos e mínimos de diâmetro adequado da gota.

2.4.2. Aquisição dos sinais elétricos

Devido a necessidade de monitoramento e análise dos dados dos processos de soldagem, a IMC – Soldagem desenvolveu o sistema de aquisição de dados de soldagem SAPV4. Este sistema é composto por uma maleta com sensores que podem medir os sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame, vazão do gás de proteção e softwares de aquisição dos sinais instalados em um computador (IMC Soldagem, 2014). Segundo o fabricante, o SAPV4 possui diversas funcionalidades, dentre elas são:

- 1) Leitura dos valores instantâneos e médios da corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás;
- 2) Exposição das informações médias através de tabelas com informações brutas ou tratadas por cordão de solda;
- 3) Sobreposição das grandezas;
- 4) Avaliação da regularidade de transferência metálica através de histogramas;
- 5) Elaboração de gráfico corrente (I) em função da tensão (U);
- 6) Visualização rápida na tela das variáveis já citadas, assim como da quantidade de arame e gás consumidos e potência.

A figura 13 apresenta um oscilograma de corrente gerado pelo SAPV4 na transferência por curto-circuito que resalta os picos de corrente (I_p), derivadas de subida (D_s) e derivadas de descida (D_d).

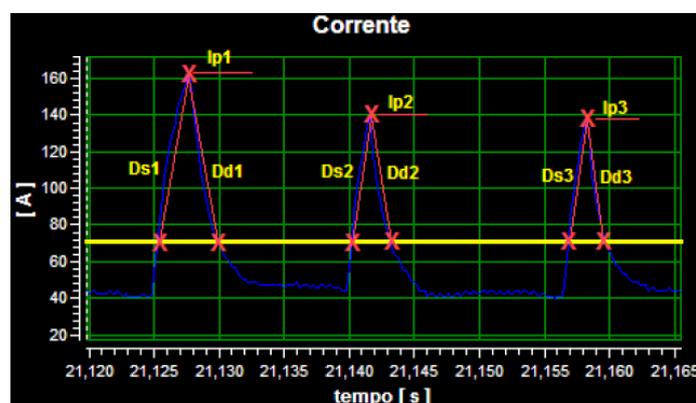


Figura 13: Oscilograma de corrente (A) versus tempo (s) na soldagem por curto-circuito (IMC Soldagem, 2014)

A figura 14 apresenta um oscilograma de tensão gerado pelo SAPV4 na transferência por curto-circuito que resalta os picos de tensão (U_p), períodos de transferência (T), períodos de arco aberto (T_a) e períodos de curto-circuito (T_c).

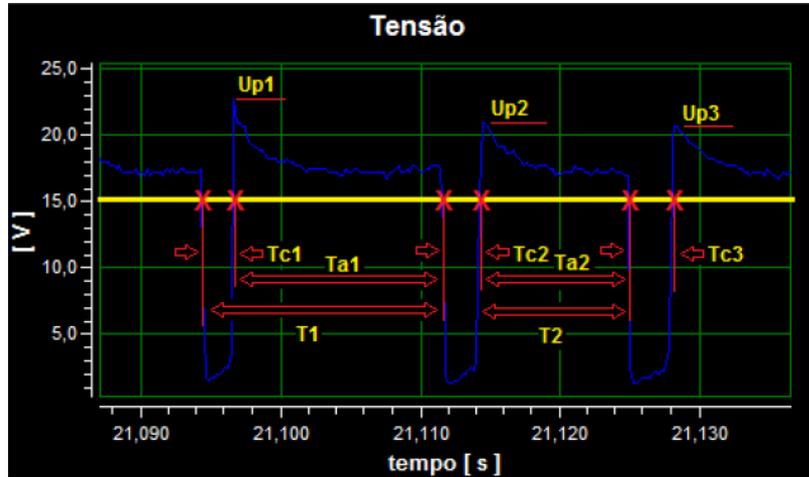


Figura 14: Oscilograma de tensão (V) na soldagem por curto-circuito versus tempo (s) (IMC Soldagem,2014).

Através dos sinais medidos, o sistema gera oscilogramas, ciclogramas e histogramas, e pode também calcular valores numéricos que servem como indicativo da estabilidade do processo de soldagem. São eles:

a) Média aritmética (\bar{X}): é a soma dos valores medidos de uma variável (x_i) dividida pelo número de medidas (n), conforme a equação 9.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

b) Desvio padrão (σ): é a raiz quadrada dos desvios médios quadráticos da variável em estudo em relação ao valor médio, conforme a equação 10.

$$\sigma = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 / (n - 1) \right]} \quad (10)$$

c) Coeficiente de variação (K_v): também conhecido como desvio relativo, é a razão entre o desvio padrão e a média, conforme a equação 11.

$$K_v = \left(\frac{\sigma}{\bar{X}} \right) \cdot 100\% \quad (11)$$

A figura 15 mostra os valores estatísticos considerados como indicadores de estabilidade do processo GMAW obtidos pelo sistema SAPV4.

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

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

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

Figura 15: Informações gerais e dados estatísticos dos sinais adquiridos pelo SAPV4 (IMC Soldagem, 2014).

2.5 Parâmetros do processo de soldagem

Os parâmetros de soldagem são as variáveis que podem alterar a geometria do cordão, a estabilidade do arco, a geração de fumos e respingos, o modo de transferência metálica, entre outros, ou seja, a qualidade da solda de uma maneira geral. Existe no processo GMAW uma grande quantidade de parâmetros a serem regulados, tais como: composição e vazão do gás de proteção, diâmetro e composição do arame-eletrodo, indutância, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, corrente, comprimento do arco (ou tensão) e de extensão livre do eletrodo, entre outros.

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).

2.5.1 Corrente de soldagem

A corrente de soldagem influencia diretamente na taxa de deposição, como também no modo de transferência metálica e nas características geométricas do cordão. 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. A medida que se aumenta a corrente, mantendo constantes os demais parâmetros, observa-se um aumento da penetração, largura e reforço, e da taxa de deposição (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 16 mostra a relação entre a velocidade de alimentação do eletrodo e a corrente de soldagem para arames de diferentes diâmetros.

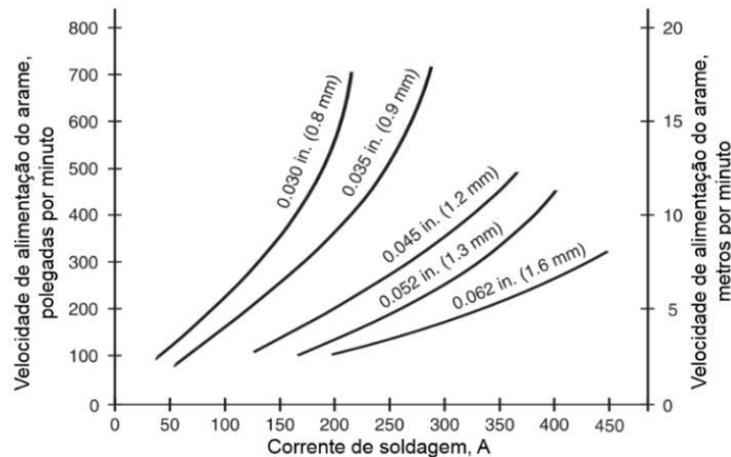


Figura 16: Relação entre a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame (Adaptado de Fortes, 2005).

2.5.2 Tensão

A tensão de soldagem se caracteriza como um dos parâmetros mais influentes no processo, pois interfere no modo de transferência metálica, na geometria do cordão de solda, no comprimento do arco, na profundidade de penetração e na formação de respingos.

Segundo Modenesi e Avelar (1997), conforme a tensão de soldagem aumenta, a estabilidade do arco elétrico tende a aumentar. No entanto, em uma determinada tensão o arco atinge um ponto de máxima estabilidade, após atingir esse ponto, a estabilidade tende a diminuir. De acordo com Machado (1996) uma tensão muito baixa tende a causar estreitamento do cordão, porosidade, e um cordão mais convexo. Em contrapartida, uma tensão excessivamente alta tende a gerar excesso de respingo e porosidade. A estabilidade do arco é prejudicada em ambos os casos.

Ao analisar a estabilidade do processo GMAW com transferência por curto-circuito Dutra *et al.* (1995) considera os desvios padrão dos picos de corrente e do tempo médio de curto-circuito, verificando 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.

2.5.3 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem se refere a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta soldada. Corresponde à relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo.

Existe uma correlação entre a velocidade de soldagem e a quantidade de energia cedida à peça. Isso demonstra que quanto maior a velocidade, menor a quantidade de calor cedida por unidade de área. Desse modo, velocidades muito baixas, além de elevar o custo da operação, podem causar alterações metalúrgicas na estrutura do material devido à concentração térmica. Ao contrário, o excesso de velocidade tende a provocar menor penetração e menor largura do cordão, possíveis mordeduras e falta de fusão, além de falta de penetração (Barbedo, 2011).

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).

2.5.4 Extensão livre do eletrodo

A extensão do eletrodo ou stick-out representa a distância entre a extremidade do bico de contato e a peça a ser trabalhada (DBCP). Essa extensão do eletrodo está relacionada à corrente de soldagem necessária para fundir o arame a certa velocidade de soldagem. Quando essa distância aumenta, ocorre um aumento da resistência elétrica do eletrodo, gerando maior aquecimento da região 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).

A importância de controlar essa extensão do eletrodo está no fato de que grandes extensões podem resultar em excesso de metal de solda sendo depositado com baixo calor de arco, resultando em baixa penetração e defeitos na geometria do cordão. Também pode tornar o arco mais instável. Em contrapartida, extensões muito

baixas, apesar de contribuir para a penetração, podem causar falta de fusão nas laterais e produzir mordeduras (Morganti, 2013). A figura 17 representa o comportamento da extensão do eletrodo em diferentes distâncias.

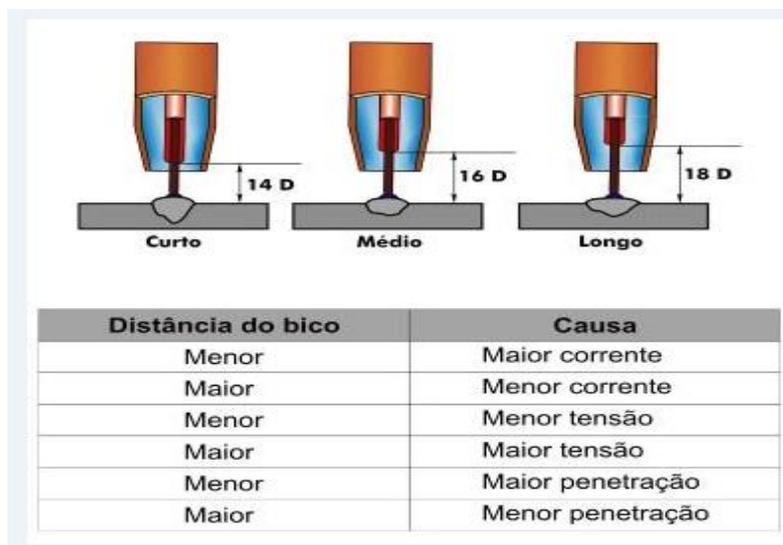


Figura 17: Diferentes distâncias entre a extremidade do bico de contato e a peça (FBTS, 2004).

2.6 Gases de proteção

O processo GMAW necessita de um fluxo gasoso de proteção cuja principal função é proteger o metal fundido (poça de fusão e metal em transferência) de contaminações atmosféricas, ou seja, evitar que o ar atmosférico entre em contato com a zona de soldagem. Isso é necessário pois a zona fundida (ZF), quando exposta ao ar atmosférico, apresenta uma forte tendência a formar óxidos e, em menor grau, nitretos. Essas reações de forma não controlada, podem provocar instabilidade do arco e descontinuidades no cordão de solda, como inclusões de escória, porosidade e fragilização do material. Além desta função principal, o gás de proteção exerce um forte efeito na estabilidade do arco, no modo de transferência metálica, na geometria do cordão de solda, na velocidade de soldagem, quantidade de respingos e escória e propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal de solda (Suban e Tušek, 2001; Stenbacka e Persson, 1989).

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 que fragilizam a estrutura, 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 CO₂ 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).

2.6.1 Propriedades dos gases de proteção

As propriedades químicas e físicas dos gases como potencial de ionização, condutividade térmica, densidade, potencial de oxidação, entre outras, definem as principais características operacionais do arco elétrico e as propriedades dos cordões de solda. Sendo assim, variáveis como tensão, perfil térmico, eficiência do arco e energia de soldagem são profundamente influenciados pela composição química do gás de proteção (Marques et al., 1998).

2.6.1.1 Potencial de ionização

O potencial de ionização é a energia total em elétron volts (eV) necessária para retirar o elétron com menor força de ligação da camada de valência de um átomo ou molécula à uma distância infinita, tornando-o um íon (Groetelaars e Scotti, 2007; Arroio et al., 2010).

O potencial de ionização (PI) representa uma característica dos elementos presentes no arco elétrico de soldagem, possuindo uma atmosfera complexa, em que se manifestam gases de proteção, metais em estado de vapor e elementos utilizados como fluxo. A facilitação dos materiais tornarem-se ionizados é condição fundamental para determinar as condições de iniciação do arco, a capacidade do arco conduzir corrente elétrica e a estabilidade do arco (Linnert, 1994)

Considerando uma mesma corrente de soldagem e mesmo comprimento de arco, um gás de baixo potencial de ionização pode transformar átomos em íons facilmente, necessitando de uma menor tensão de soldagem para abertura de arco e estabilidade do processo. Por outro lado, ao utilizar um gás de alto potencial de ionização a tensão deverá ser elevada (Scotti e Ponomarev, 2008). A tabela 1 mostra o potencial de ionização dos gases de proteção comumente utilizados em soldagem.

Tabela 1: Potencial de ionização dos gases de proteção
(Adaptado de Scotti e Ponomarev, 2014; The National Institute of Standards and Technology, 2014)

Gás	Ar	CO ₂	C ₃ H ₆	H ₂	N ₂	O ₂
PI (eV)	15,8	14,4	9,73	13,5	14,5	13,2

2.6.1.2 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. Gases menos densos precisam de uma maior vazão para promover uma adequada proteção durante a soldagem (Liskevych, 2010). No entanto, esse aspecto fica restrito à soldagem na posição plana. Para a soldagem na posição sobre cabeça, gases de menor densidade tendem a ser mais eficientes na proteção da soldagem. Já nas posições de soldagem horizontal e vertical, a densidade alta ou baixa do gás não favorecem a proteção, sendo sugerido aumentar o fluxo de gás um pouco acima da recomendada. (AWS, 2004; 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
(Adaptado de Scotti e Ponomarev, 2014; Air Liquide, 2014)

Gás	Ar	CO ₂	C ₃ H ₆	H ₂	N ₂	O ₂
Densidade (Kg/m ³)	1,784	1,977	1,81	0,0898	1,192	1,333

2.6.1.3 Condutividade térmica

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

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.

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).

Segundo a AWS (2004) a soldagem a arco com proteção gasosa feita pelo He produz um cordão de solda com perfil amplo e parabólico. Já a soldagem protegida por Ar produz um cordão de solda estreito e profundo (tipo cálice), conforme pode ser observado na figura 18.

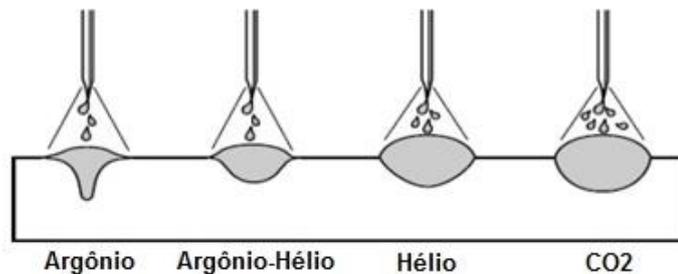


Figura 18: Perfis de penetração dos gases de proteção (Adaptado de AWS,2004).

2.6.1.4 Potencial de oxidação

Os gases e misturas gasosas oxidantes contendo CO₂, Ar+CO₂, Ar+O₂, CO₂+O₂ e outros são extremamente utilizados industrialmente na soldagem. Nas soldagens em que estes gases estão envolvidos, uma significativa perda de elementos de liga e impurezas é observada no metal fundido ao arco, pela interação com o

oxigênio. A razão da oxidação do metal pelo gás de proteção depende da composição de ambos e dos parâmetros de soldagem. O potencial de oxidação (PO) geralmente pode ser definido como a capacidade de o gás de proteção oxidar um metal durante a soldagem (Novozhilov, 1988).

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).

Segundo Scotti e Ponomarev (2014), um baixo potencial de oxidação pode causar transtornos no processo de soldagem, redução da estabilidade do arco e a molhabilidade (relação entre a tensão superficial do metal fundido e o metal de base) e favorecer a formação de cordões irregulares e convexos. Por outro lado um potencial de oxidação elevado também pode causar transtornos, similares aos que a falta de proteção proporciona, como exemplo: poros, fragilização do metal de solda, perda significativa de elementos de liga, aumento na emissão de fumos, alteração das propriedades mecânicas, entre outros.

2.6.2 Gases de proteção convencionais

Nas últimas décadas em soldagem vem sendo utilizado como gás de proteção o argônio (Ar), o dióxido de carbono (CO₂) e o hélio (He), que são usados puros ou misturados entre si. Em alguns casos, pequenas quantidades de oxigênio (O₂) são misturadas aos anteriores. Adições de elementos redutores como o hidrogênio (H₂) e o nitrogênio (N₂) são citadas na soldagem de aços inoxidáveis e outras aplicações específicas conforme mostra o trabalho de Tatagiba *et al.*, (2012).

Conhecer as características e propriedades de cada gás é de fundamental importância, pois isso causa implicações no desenvolvimento do processo de soldagem, conseqüentemente, nos resultados finais atingidos.

2.6.2.1 Argônio (Ar)

O Ar é um gás incolor, inodoro e insípido. Não é inflamável e nem tóxico. Por não reagir quimicamente com outros elementos é classificado como inerte. O argônio é obtido da atmosfera, entretanto ele está presente nesta em uma quantidade de

apenas 0,934%. Devido a sua elevada densidade em relação ao ar, ele promove com eficiência a proteção da região de soldagem. Além disso, o Ar facilita a iniciação do arco elétrico, assim como a estabilidade deste (Tušek e Suban, 2000).

Este gás tem uma condutividade térmica e potencial de ionização baixo, essas propriedades resultam em uma baixa transferência de calor para as zonas externas do arco, isso forma uma coluna estreita no arco elétrico proporcionando dessa forma um perfil de penetração profundo e relativamente estreito (Linnert, 1944).

Quase todos os processos de soldagem podem utilizar Ar ou misturas contendo-o para atingir níveis adequados de estabilidade, propriedades mecânicas e produtividade. Para soldagem de materiais não ferrosos como alumínio, ligas de níquel, ligas de cobre, metais reativos como zircônio e titânio utiliza-se o argônio puro. Já para soldagem de materiais ferrosos, normalmente o argônio é misturado com gases ativos (Fortes, 2005; AWS, 2011).

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 O_2 e o CO_2 , contribui para a formação de filmes de óxidos, facilitando o processo de emissão catódica (Rao, et. al., 2010).

2.6.2.2 Dióxido de carbono (CO_2)

O CO_2 é o único gás ativo utilizado puro para proteção de soldas realizadas em aço carbono e baixa liga, os demais são utilizados em misturas com gases inertes. Este gás é amplamente utilizado na soldagem GMAW devido as suas características de promover alta velocidade de soldagem, maior penetração e baixo custo inicial (Kah e Martikainen, 2013; Stenbacka e Persson, 1989;).

A adição progressiva de CO_2 na mistura de proteção à base de Ar aumenta a penetração e a largura do cordão de solda e diminui o reforço. Porém, gera maior quantidade de fumos, escória e respingo, além de remover elementos de liga presentes no metal de solda, exigindo assim um eletrodo com teores elevados de desoxidantes. Todos esses fatores influenciam no custo final da solda, ou seja, o baixo custo do gás. (Liskevych e Scotti, 2015; Vaidya, 2002; AWS, 2011).

2.6.2.3 Hélio (He)

O He é um gás quimicamente inerte, incolor, inodoro e insípido. Não é inflamável e nem tóxico. Por não ser extraído da atmosfera, mas sim de reservas de gás natural existentes em poucos países, tem um custo elevado em relação ao Ar. Diferentemente do Ar, o He possui um elevado potencial de ionização, o que dificulta a ignição do arco elétrico e a estabilidade deste além de exigir uma maior tensão de soldagem que o Ar para uma mesma corrente e comprimento do arco (Scotti e Ponomarev, 2014; White Martins, 2010).

Sua aplicação é em soldas cujo necessita-se de um maior aporte térmico, molhabilidade e velocidade de soldagem. Na soldagem MIG o He é frequentemente adicionado ao Ar para obter-se vantagens e características de ambos os gases (Fortes, 2005).

2.6.2.4 Oxigênio (O₂)

O O₂ é um gás ativo oxidante que não é utilizado puro ou como gás base em uma mistura de proteção gasosa, sendo aplicado como elemento de misturas com gases a base de Ar. A adição do oxigênio no argônio no processo GMAW melhora a estabilidade do arco e diminui a tensão superficial do metal de solda (AWS, 2011; Nadzam et al., 2011). A redução da tensão superficial diminui o ângulo de molhamento do cordão de solda e conseqüentemente o reforço que é um concentrador de tensões (Pires et al., 2007; Scotti e Ponomarev, 2014).

A adição excessiva de O₂ na mistura de proteção pode gerar porosidade e oxidar elementos de liga do metal soldado, influenciando nas propriedades mecânicas do mesmo. É necessário, assim como como no CO₂, o uso de elementos desoxidantes no arame-eletrodo, podendo gerar um aumento na formação de escória gerando dificuldades para a remoção da mesma e/ou inclusão de escória no metal de solda (Jonsson *et al.*, 1995).

2.6.3 Misturas gasosas

Em geral são utilizadas misturas de gases para proteção em soldagem, isto por que cada componente pode colaborar de uma forma. Segundo Scotti e Ponomarev (2008) a eficiência do gás ou da mistura é verificada pela proteção da poça de fusão

e das gotas em transferência, de reações com elementos nocivos presentes no meio ambiente. Também procura destacar a influência do comportamento reativo do gás com o metal de solda.

2.6.3.1 Misturas Ar-CO₂

As misturas argônio-dióxido de carbono são usadas principalmente nos aços carbono e de baixa liga e, com aplicação limitada, em aços inoxidáveis. As adições de argônio ao dióxido de carbono diminuem os níveis de respingo normalmente experimentados com o dióxido de carbono puro (Bracarense, 2003).

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.

Ar / 11-20% CO₂ – essa faixa de misturas tem sido empregada em diversas aplicações de soldagem MIG/MAG como chanfro estreito, soldagem fora de posição de chapas finas e soldagem a altas velocidades. A maioria das aplicações é em aços carbono e de baixa liga. Misturando o dióxido de carbono nessa faixa, pode ser alcançada a produtividade máxima na soldagem de peças de pequena espessura. Isso é feito minimizando a possibilidade de furar a peça e simultaneamente maximizando as taxas de deposição e as velocidades de soldagem. Menores teores de dióxido de carbono também melhoram a eficiência de deposição por meio da redução das perdas por respingos (Fortes, 2005).

Ar / 21-25% CO₂ – essa faixa é universalmente conhecida como o gás usado na soldagem MAG com transferência por curto-circuito em aços. Foi originalmente formulado para maximizar a frequência de curto-circuito em arames sólidos de diâmetros 0,8 mm e 0,9 mm, mas, ao longo dos anos, tornou-se o padrão de fato para a maioria dos diâmetros dos arames sólidos e também dos arames tubulares mais comuns. Essa mistura funciona bem em aplicações de altas correntes em materiais

esessos, e pode alcançar boa estabilidade do arco, controle da poça de fusão e aparência do cordão, bem como alta produtividade (Fortes, 2005).

2.6.4 Propileno

O propileno é um hidrocarboneto com fórmula molecular C_3H_6 , que pode ser utilizado na mistura de proteção no processo GMAW. É um gás combustível incolor, inflamável em pressão e temperaturas ambientes, com odor ligeiramente adocicado, apesar de não ser tóxico em ambientes fechados o gás pode causar asfixia, pois altera a concentração do ar e torna a atmosfera deficiente em oxigênio (Air Liquide, 2010, White Martins 2010).

Segundo Ribeiro (2016) os hidrocarbonetos, no seu estado livre, quando na presença de elevadas pressões tornam-se instáveis e vão se reduzir em seus elementos básicos, no caso do propileno, em carbono e hidrogênio, quando isso acontece liberam grande quantidade de calor.

O gás propileno apresenta a melhor relação H/C. Isso implica concluir que a cada molécula de H_2 que pode ser liberada também se tem a possibilidade de fornecer C. Na sua dissociação o propileno libera o dobro de hidrogênio para um carbono. Com isso, o hidrogênio retarda a formação de óxidos na superfície do metal já que reduz o potencial de oxidação do arco para um valor mais adequado, contribuindo assim para um cordão de solda mais limpo e de melhor aparência. A redução desse potencial é importante para a solda, pois um potencial muito elevado pode trazer instabilidade ao processo (Ramalho, 2008).

As reações de dissociação e de ionização, em temperaturas mais altas, começam a ocorrer e alteram drasticamente a estrutura química do gás se comparado com o seu estado em baixa temperatura, alterando de forma significativa como a energia deve ser levada em conta (Bottin, 2000).

De acordo com Moreira (2008) na ionização o gás de proteção realiza um processo endotérmico, absorvendo a energia do arco voltaico (energia de ionização), e, ao encontrar o metal base, o processo é revertido, fazendo com que íons e elétrons se recombinem e liberem a energia anteriormente acumulada (processo exotérmico) para a poça de fusão.

Modenesi (2009) relata que os íons resultantes das reações em alta temperatura podem se recombinar/associar liberando energia sob a forma de calor na

poça de fusão. Ao ser misturado com o gás CO₂, o propileno continua em estado gasoso devido ao seu baixo valor de pressão crítica, comparado com o CO₂. Mesmo sob elevadas pressões, devido a essas características, a mistura dos dois gases não pode ser liquefeita, permanecendo somente em estado gasoso.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e a metodologia aplicada para avaliar os efeitos da adição de propileno em misturas gasosas convencionais na soldagem pelo método GMAW com transferência metálica por curto-circuito.

3.1. Materiais

- Chapas de aço carbono SAE 1020 com dimensões: 200 x 50 x 6,35 mm.
- Bobina de arame, classificação ER70S-6, de $\varnothing 1,2$ mm

A tabela 3 apresenta as especificações em relação à composição química do metal de base (AWS A5.18) e do arame eletrodo utilizado.

Tabela 3: Especificação da composição química do metal base (AWS A5.18) e do arame eletrodo

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

- Discos de corte e desbaste
- Lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*
- Líquido penetrante lavável em água VP30 e Revelador D-70.
- Pasta abrasiva de alumina 0,3; 0,5 e 1 μm
- Solução de Nital (ácido nítrico + álcool etílico) 2% e 5%
- Verniz incolor
- Misturas de gases fornecidas pela empresa White Martins, com as seguintes composições (tabela 4).

Tabela 4: Composição dos gases de proteção

Nomenclatura	Composição (%)
Ar+12%CO ₂	88%Ar + 12% CO ₂
Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	87,6%Ar + 12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆
Ar+25%CO ₂	75%Ar + 25%CO ₂
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	74,4%Ar + 25%CO ₂ + 0,6%C ₃ H ₆

3.2 Equipamentos

- Balança de precisão com resolução de 0,1 g (FAETEC);
- Balança de precisão com resolução de 0,001 g (UENF);
- Conjunto semiautomático para soldagem GMAW; marca ESAB; modelo Smashweld 316 com tensão constante e alimentador de arame embutido (FAETEC);
- Coletor de respingos e escória em formato de caixa (Santos 2018, FAETEC);
- Escova de aço para limpeza do cordão de solda (FAETEC);
- Equipamento de embutimento automático (UENF);
- Lixadeira semiautomática Struers-Panambra DP-10 (UENF);
- Máquina de corte Mesotom; marca Struers-Panambra com refrigeração a água contendo óleo solúvel (UENF);
- Microscópio ótico Olympus com aumento que varia de 50x a 1000x (UENF);
- Microscópio ótico Olympus com capacidade de aumento entre 50x a 500x (UENF);
- Microdurômetro Shimadzu HVM-2T na escala de dureza Vickers (HV) (UENF);
- Picadeira com mola para remoção de escória (FAETEC);
- Paquímetro; marca Mitutoyo com resolução de 0,05 mm (UENF);
- Sistema de aquisição de dados SAPV4 do fabricante IMC Soldagem (UENF);
- Trator de soldagem modelo A2T MULTITRAC, fabricante ESAB (FAETEC).

3.3 Metodologia

Para esse trabalho foram realizadas soldas do tipo cordão sobre a chapa com o objetivo de estudar os efeitos da adição do propileno nas misturas de gases convencionais sobre a estabilidade do processo GMAW, sendo executada em três etapas.

A primeira etapa teve como objetivo definir os parâmetros de soldagem e determinar as faixas operacionais de trabalho para cada gás de proteção, em que o processo apresente uma adequada estabilidade. Na segunda etapa foram realizadas novas soldas utilizando os parâmetros determinados na etapa anterior para avaliar e comparar os efeitos da adição do propileno nos gases convencionais analisando a aparência dos cordões de solda e sua geometria, taxa de deposição, quantidade de escória e de respingos gerados. Por fim, na terceira etapa, o objetivo foi avaliar se a adição do propileno influenciou nas características e propriedades do metal de solda.

3.3.1 Etapa 1

Para definir os parâmetros de soldagem e determinar as faixas operacionais de trabalho com adequada estabilidade para o processo foram executadas soldas do tipo cordão sobre a chapa. Para isso, foram definidos dois valores de velocidade de alimentação de arame (V_{alim}), variando o valor da tensão em uma determinada faixa. Com os dados dos sinais elétricos que foram registrados no equipamento SAP foi possível calcular e avaliar os índices de estabilidade do processo. Após a soldagem as chapas foram analisadas por meio de inspeção visual e ensaio de líquido penetrante com o objetivo de avaliar a incidência de possíveis descontinuidades na superfície do cordão.

3.3.1.1 Preparação das chapas

Chapas de aço carbono SAE 1020 foram cortadas com dimensões 200x50x6,35 mm com o auxílio de uma serra elétrica que utiliza mistura de água e óleo para resfriamento. Em seguida, as chapas foram limpas para retirada de contaminantes e com um disco de desbaste foram removidos possíveis resíduos de oxidação superficial.

3.3.1.2 Parâmetros de soldagem

Para a realização dos testes foram fixados alguns parâmetros como mostra a tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros mantidos fixos na soldagem das chapas

Arame	ER70S-6 de diâmetro 1,2 mm
Velocidade de soldagem	300 mm/min
Ângulo da tocha	90°
DBCP	12 mm
Vazão de gás	15 l/min
V_{alim}	4 e 5 m/min

Segundo a White Martins (2010), a faixa de corrente para a soldagem utilizando o arame ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, com transferência metálica por curto-circuito varia de 120-230 A. O trabalho de Ribeiro (2016) utilizando os mesmos gases de proteção com V_{alim} entre 4 m/min e 5 m/min, trabalhando na faixa de tensão de 19 a 21 V obteve um resultado satisfatório. Deste modo, esses valores de V_{alim} foram utilizados para realizar as soldas nessa etapa.

A tensão de trabalho variou entre 15 a 21 V, com incrementos de 1 V. Foi realizado um cordão de solda para cada valor de tensão. Este procedimento foi repetido para cada gás de proteção e com as duas V_{alim} utilizadas. Um total de 56 soldas foram executadas.

3.3.1.3 Aquisição dos sinais elétricos

Durante a soldagem os sinais elétricos foram captados pelo sistema SAPV4 que registrou os valores de tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame e a vazão de gás. Os dados foram registrados a cada 0,01 s. A captação dos sinais ocorreu no intervalo de 10 a 30 s, evitando os valores iniciais e finais de cada solda, pois o início e fim são marcados por abertura e fechamento do arco elétrico o que pode ocasionar grande instabilidade.

3.3.1.4 Análise Qualitativa

Durante a soldagem, as soldas foram avaliadas qualitativamente quanto à produção de respingos, escória e ruídos. Após a soldagem, foram realizados a inspeção visual e o ensaio de líquido penetrante, que tem por objetivo detectar a presença de possíveis descontinuidades superficiais.

Para executar a inspeção visual, foi realizada a limpeza da chapa por escovamento sobre o cordão de solda e em aproximadamente 25 mm adjacentes às margens da solda, verificando a presença de descontinuidades grosseiras como: trincas, poros, falta de fusão, mordeduras, etc. O ensaio de inspeção visual foi realizado conforme o procedimento PR-050 (ABENDI, 2011).

O ensaio líquido penetrante foi utilizado para identificar pequenas descontinuidades não observadas na inspeção visual seguindo o procedimento PR-001 (ABENDI, 2008). O ensaio compreende a limpeza para remoção de sujeiras, aplicação do líquido penetrante, tempo de espera para que o líquido penetre na descontinuidade, remoção do penetrante, aplicação do revelador por spray e revelação.

3.3.1.5 Avaliação dos sinais elétricos

Com base nos sinais elétricos registrados pelo sistema SAPV4 foi possível obter os seguintes índices de estabilidade da transferência metálica por curto-circuito para o processo, conforme itens abaixo:

- Desvio padrão de picos de corrente (DPPC);
- Desvio padrão do período de arco aberto (DPAA);
- Desvio padrão do período de curto circuito (DPCC);
- Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV_{cc}).

Foram plotados gráficos que mostram a variação dos valores dos índices de estabilidade em função do valor da tensão aplicada. Importante salientar que os menores valores dos índices indicam uma maior estabilidade do processo. Sendo assim, os intervalos de tensão que apresentaram os menores valores dos índices de estabilidade indicam a faixa operacional de trabalho em que a estabilidade é considerada adequada. Pelos resultados da análise qualitativa e dos sinais elétricos, foi determinado um valor de tensão de trabalho para cada gás de proteção de cada V_{alim} .

3.3.2 Etapa 2

Com o objetivo de avaliar e comparar os efeitos da adição do propileno nos gases convencionais, foram realizadas novas soldas utilizando os parâmetros determinados na etapa 1. As soldas foram analisadas através de inspeção visual e ensaio de líquido penetrante. Também foi analisado a aparência dos cordões de solda e sua geometria, a taxa de deposição e a quantidade de escória e de respingos gerados.

3.3.2.1 Soldagem

A preparação das chapas seguiu o mesmo procedimento descrito no item 3.3.1.1 acima. O equipamento de soldagem foi regulado de acordo os parâmetros da tabela 5, utilizando o valor de tensão determinada na etapa 1. Foram realizadas dois cordões de solda para cada mistura de gás e V_{alim} utilizando os mesmos parâmetros de soldagem. Obtendo um total de 16 cordões de solda.

3.3.2.2 Aquisição dos sinais elétricos

A obtenção dos sinais elétricos foi realizada conforme descrito no item 3.3.1.3 acima.

3.3.2.3 Análise Qualitativa

Durante a soldagem, as soldas foram avaliadas qualitativamente quanto à produção de respingos, escória e ruído. Após a soldagem foi realizada a inspeção visual, para verificar a aparência e a presença de descontinidades superficiais, de acordo com a norma PR-050 (ABENDI, 2011). Posteriormente foi feito o ensaio de líquido penetrante (LP) para evidenciar descontinidades superficiais que não foram possíveis de detectar com a inspeção visual, conforme o procedimento PR-001 (ABENDI, 2008).

3.3.2.4 Avaliação dos sinais elétricos

A partir da análise dos sinais elétricos foram calculados os índices de estabilidade do processo, conforme descrito no item 3.3.1.5. Com os valores obtidos foram feitos gráficos que mostram o comportamento dos índices de estabilidade para cada gás de proteção e V_{alim} em função da tensão aplicada. Foi então possível comparar a estabilidade do processo utilizando os gases convencionais em relação aos gases com a adição de C_3H_6 .

3.3.2.5 Taxa de respingo e escória

Durante a soldagem foi utilizado um coletor em formato de caixa, como mostra a figura 19, para realizar a coleta dos respingos e escória gerados.

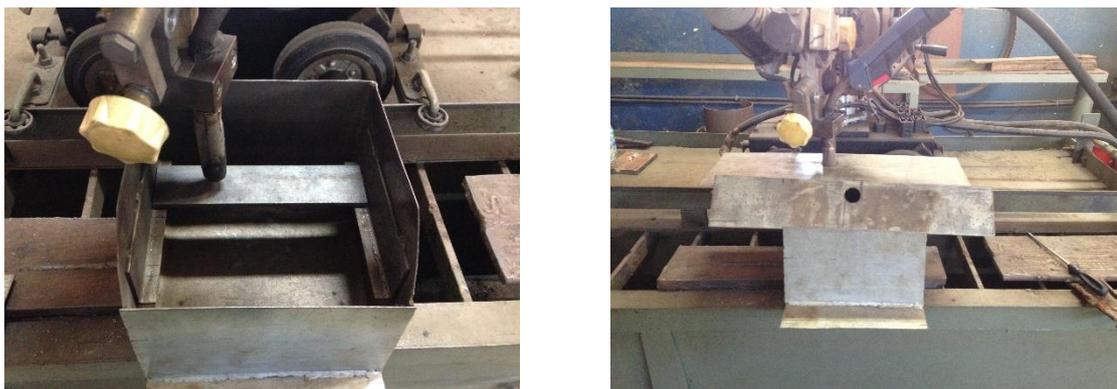


Figura 19: Coletor de respingos (Santos, 2018)

Após a soldagem dos corpos de prova da cada gás, os respingos e escória gerados, que ficaram retidos no bocal da tocha, na chapa e no coletor de respingos foram coletados e armazenados. A seguir, com o auxílio de um ímã, foram separados a escória e o respingo e posteriormente pesados em uma balança de precisão com resolução de 0,001 g.

Com a obtenção desses dados, foi possível calcular a taxa de respingos (T_{res}), através da quantidade de respingo gerado (Q_{res}), dividido pelo tempo de soldagem total das chapas (ΣTS), calculada pela equação 12.

$$T_{res} = \frac{Q_{res}(g)}{\Sigma TS(s)} \quad (12)$$

A taxa de escória (T_{esc}), corresponde a quantidade de escória gerada (Q_{esc}) dividido pelo tempo de soldagem total das chapas (ΣTS), calculada pela equação 13.

$$T_{esc} = \frac{Q_{esc}(g)}{\Sigma TS(s)} \quad (13)$$

3.3.2.6 Taxa de deposição

Para calcular a taxa de deposição foi necessário pesar as chapas antes e após ser feita a soldagem utilizando uma balança de resolução de 0,1 g. A partir destes valores determinou-se a quantidade de metal depositado pela diferença dos pesos da chapa antes e após a soldagem.

A taxa de deposição (TD) é calculada de acordo com a equação 14, que é a razão entre a quantidade de metal depositado (kg) e o tempo de soldagem da chapa (h), tendo o resultado expresso em kg/h.

$$Td \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{\text{Quantidade de Metal Depositado}}{\text{tempo soldando a chapa}} \quad (14)$$

3.3.2.7 Geometria do cordão de solda

Foram preparadas macrografias com os corpos de prova de cada gás de proteção. As soldas foram cortadas na direção transversal ao cordão de solda e preparadas metalograficamente usando lixas de granulometrias de 100 a 600 *mesh*, sendo a seguir atacada quimicamente com uma solução de Nital 5%. Com o auxílio de um paquímetro foi medida a penetração (P), reforço (r) e largura (L) dos cordões, conforme apresentado na figura 20.

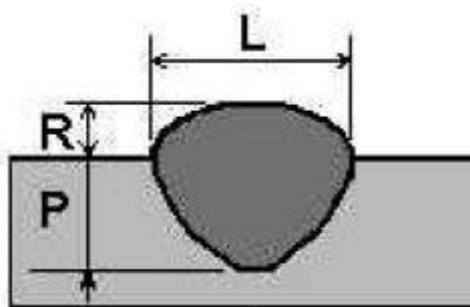


Figura 20: Parâmetros geométricos de solda. (P) Penetração; (R) Reforço; (L) Largura (Adaptado de Silva e Scotti, 2002).

3.3.3 Etapa 3

Esta etapa tem como objetivo avaliar os efeitos da adição do propileno nas características e propriedades do metal de solda, por meio da análise de microestrutura e medição da dureza do cordão de solda. Foi avaliado uma amostra de cada gás de proteção em cada V_{alim} .

3.3.3.1 Microestrutura do metal de solda

A análise microestrutural tem como finalidade identificar os constituintes da zona fundida do cordão de solda. Para isso foi retirada uma seção transversal do centro das chapas de aço de cada gás. Essas seções foram embutidas a quente e as superfícies das amostras foram preparadas metalograficamente seguindo os respectivos procedimentos: utilização de lixas com granulometria que variam de 100 até 1200 *mesh*, polimento com pasta de alumina de granulometria 1 μm , 0,3 μm e de 0,05 μm e o ataque químico com uma solução de Nital 2%.

As amostras preparadas foram analisadas e fotografadas no microscópio Óptico Olympus. Os microconstituintes presentes no metal de solda foram classificados conforme a figura 21, desenvolvida pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

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)	Dois 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).

Figura 21: Microestruturas principais do metal de solda (Adaptado Silva *et. al.*, 2001).

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 utilizando um Microdurômetro Shimadzu HMV-2T calibrado para uma carga de 1 kg e duração de 15 s. Foram realizadas 18 medições de dureza nas três regiões: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF), conforme mostra a figura 22. Os valores de dureza foram determinados diretamente no equipamento, de acordo com a equação 15:

$$HV \left(\frac{Kg}{mm^2} \right) = \frac{1854xF}{d^2} \quad (15)$$

Onde:

F = carga; d = diagonal da impressão regular quadrática.

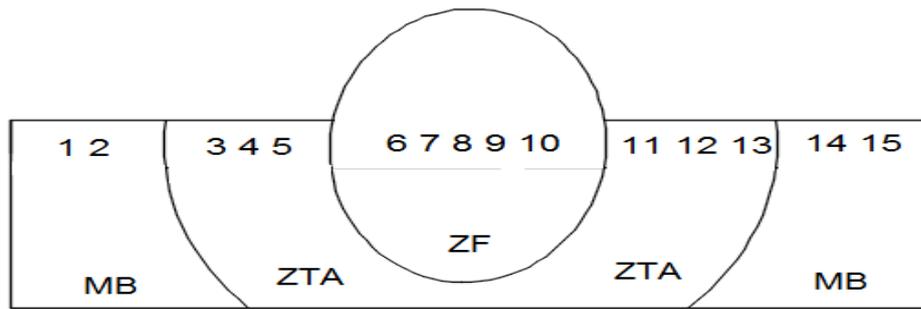


Figura 22: Localização dos pontos das medições de dureza Vickers

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Etapa 1

4.1.1 Parâmetros de soldagem

Nesta etapa foram definidos os parâmetros de soldagem e determinadas as faixas operacionais de trabalho que apresentaram adequada estabilidade durante o processo de soldagem. Constatou-se que os valores médios de corrente foram entre 168 a 192 A para a V_{alim} de 4 m/min, e 201 a 221 A para a V_{alim} de 5 m/min.

4.1.2 Análise Qualitativa

Os resultados da Inspeção Visual (IV), ensaio de Líquido Penetrante (LP) dos cordões de solda e a avaliação quanto a produção de respingo, escória e ruído realizada durante a soldagem, são comentados a seguir:

- Ar+25%CO₂ – V_{alim} de 4 m/min

A tabela 6 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+25%CO₂ com V_{alim} de 4 m/min. Os cordões de solda apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP apontou indícios de descontinuidades nas extremidades das soldas nas tensões de 15, 16 e 17 V. No entanto, como citado na metodologia, durante o ensaio de LP as extremidades das soldas não foram consideradas. O ensaio também apontou descontinuidades na lateral do cordão de solda na tensão de 20 V, indicando um espalhamento excessivo do cordão, que foi atribuído ao valor elevado da tensão. As tensões de 15 a 17 V apresentaram durante a execução das soldas uma menor formação de respingos e de escória e menor nível de ruídos. A partir da tensão de 18 V, conforme a tensão aumentava, notou-se um aumento na formação e no tamanho dos respingos, que indica um aumento na instabilidade do processo. A avaliação qualitativa mostrou que o processo apresentou melhor estabilidade para as tensões de 15, 16 e 17 V.

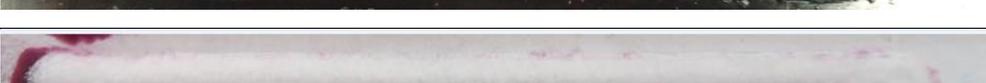
Tabela 6: IV e ensaio LP das soldas com Ar+25%CO₂ – V_{alim} de 4 m/min

Tensão	Ensaio	Ar+25%CO ₂ – V _{alim} 4 m/min
15 V	IV	
	LP	
16 V	IV	
	LP	
17 V	IV	
	LP	
18 V	IV	
	LP	
19 V	IV	
	LP	
20 V	IV	
	LP	
21 V	IV	
	LP	

- Ar+25%CO₂ – V_{alim} de 5 m/min

A tabela 7 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+25%CO₂ com V_{alim} de 5 m/min. Os cordões de solda apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP apontou indícios de descontinuidades nas extremidades das soldas nas tensões de 15 a 19 V, que não foram consideradas. Nas tensões de 15 a 18 V foi observada uma melhor aparência e menor quantidade de respingos e escória gerados. Nas tensões de 19 a 21 V foi possível perceber, durante a execução dos cordões de solda, um pequeno aumento na quantidade de respingos gerados e no nível de ruídos. A avaliação qualitativa mostrou que o processo apresentou melhor estabilidade para as tensões de 15, 16, 17 e 18 V.

Tabela 7: IV e ensaio LP das soldas com Ar+25%CO₂ – V_{alim} de 5 m/min

Tensão	Ensaio	Ar+25%CO ₂ – V _{alim} 5 m/min
15 V	IV	
	LP	
16 V	IV	
	LP	
17 V	IV	
	LP	
18 V	IV	
	LP	
19 V	IV	
	LP	
20 V	IV	
	LP	
21 V	IV	
	LP	

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

A tabela 8 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ com V_{alim} de 4 m/min. As soldas apresentaram aspecto visual uniforme. No entanto, nas tensões de 18 e 19 V foram observadas um aumento da concentração de respingos na lateral dos cordões de solda. O ensaio de LP não revelou indícios de descontinuidades nos cordões de solda. As soldas executadas nas tensões de 15 a 17 V apresentaram um bom desempenho operacional, gerando pequena quantidade de respingos e escória e baixo nível de ruídos. Os cordões de solda feitos com tensões de 18 a 21 V apresentaram maior quantidade de respingos e escória e nível ruídos não uniforme, que mostra uma instabilidade no processo. A avaliação qualitativa mostrou que o processo apresentou melhor estabilidade para as tensões de 15, 16 e 17 V.

Tabela 8: IV e ensaio LP das soldas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ -V_{alim} de 4 m/min

Tensão	Ensaio	Ar+25%CO ₂ + 0,6%C ₃ H ₆ – V _{alim} 4 m/min
15 V	IV	
	LP	
16 V	IV	
	LP	
17 V	IV	
	LP	
18 V	IV	
	LP	
19 V	IV	
	LP	
20 V	IV	
	LP	
21 V	IV	
	LP	

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

A tabela 9 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ com V_{alim} de 5 m/min. As soldas apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP não revelou indícios de descontinuidades nos cordões de solda. As soldas realizadas com as tensões de 15 e 16 V não foram concluídas. Durante as tentativas de soldagem com baixas tensões houve uma elevada formação de respingos e pequenas explosões, mostrando a instabilidade do processo. As tensões de 17 a 19 V apresentaram menor quantidade de respingos e escória e ruído uniforme. As soldas realizadas nas tensões de 20 e 21 V apresentaram um aumento na formação de respingos e escória. A avaliação qualitativa mostrou que o processo apresentou melhor estabilidade para as tensões de 17, 18 e 19 V.

Tabela 9: IV e ensaio LP das soldas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ – V_{alim} de 5 m/min

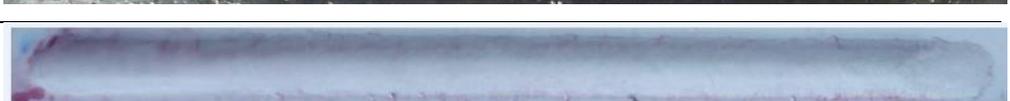
Tensão	Ensaio	Ar+25%CO ₂ + 0,6%C ₃ H ₆ – V _{alim} 5 m/min
15 V	IV	
	LP	
16 V	IV	
	LP	
17 V	IV	
	LP	
18 V	IV	
	LP	
19 V	IV	
	LP	
20 V	IV	
	LP	
21 V	IV	
	LP	

- Ar+12%CO₂ – V_{alim} de 4 m/min

A tabela 10 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+12%CO₂ com V_{alim} de 4 m/min. As soldas apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP não revelou indícios de descontinuidades nos cordões de solda. As tensões de 15 a 17 V apresentaram menor quantidade de respingos e escória e ruído uniforme. Nas

tensões de 19 a 21 V ocorreu um aumento na quantidade de escória, respingos e ruídos. A avaliação qualitativa mostrou que o processo apresentou melhor estabilidade para as tensões de 15, 16 e 17 V.

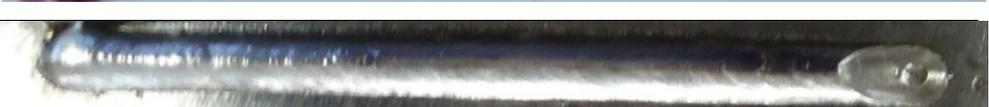
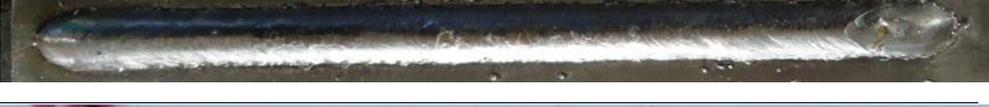
Tabela 10: IV e ensaio LP das soldas com Ar+12%CO₂ – V_{alim} de 4 m/min

Tensão	Ensaio	Ar+12%CO ₂ – V _{alim} 4 m/min
15 V	IV	
	LP	
16 V	IV	
	LP	
17 V	IV	
	LP	
18 V	IV	
	LP	
19 V	IV	
	LP	
20 V	IV	
	LP	
21 V	IV	
	LP	

- Ar+12%CO₂ – V_{alim} de 5 m/min

A tabela 11 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+12%CO₂ com V_{alim} de 5 m/min. Os cordões de solda apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP apontou indícios de descontinuidades nas extremidades das soldas nas tensões de 15 a 21 V, que não foram consideradas. As tensões de 15 a 18 V apresentaram durante a execução das soldas uma menor formação de respingos e de escória e menor nível de ruídos. A partir da tensão de 20 V, conforme a tensão aumentava, notou-se um aumento na formação dos respingos e escórias, que indica um aumento na instabilidade do processo. A avaliação qualitativa mostrou que o processo apresentou melhor estabilidade para as tensões de 16, 17 e 18 V.

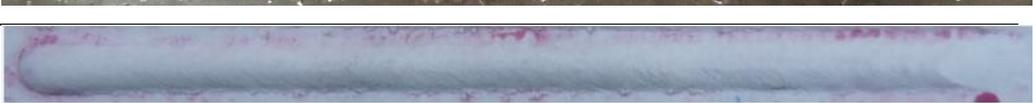
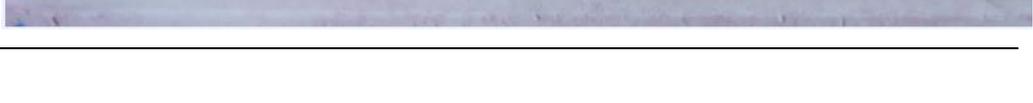
Tabela 11: IV e ensaio LP das soldas com Ar+12%CO₂ – V_{alim} de 5 m/min

Tensão	Ensaio	Ar+12%CO ₂ – V _{alim} 5 m/min
15 V	IV	
	LP	
16 V	IV	
	LP	
17 V	IV	
	LP	
18 V	IV	
	LP	
19 V	IV	
	LP	
20 V	IV	
	LP	
21 V	IV	
	LP	

- Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ – V_{alim} de 4 m/min

A tabela 12 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ com V_{alim} de 4 m/min. Os cordões de solda apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP não revelou indícios de descontinuidades nos cordões de solda. Nas tensões de 15 e 16 V foram observados estreitamento dos cordões de solda. As tensões de 15 a 17 V apresentaram durante a execução das soldas uma menor formação de respingos e de escória e menor nível de ruídos. No entanto, nas tensões de 20 e 21 V, notou-se um aumento na formação dos respingos e escória, que indica um aumento na instabilidade do processo. A avaliação qualitativa mostrou que o processo apresentou melhor estabilidade para as tensões de 15, 16 e 17 V.

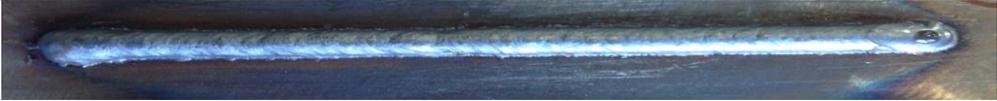
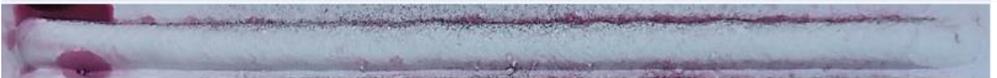
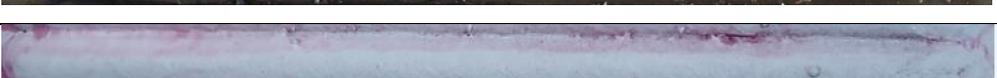
Tabela 12: IV e ensaio LP das soldas com Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ - V_{alim} de 4 m/min

Tensão	Ensaio	Ar+12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆ - V _{alim} 4 m/min
15 V	IV	
	LP	
16 V	IV	
	LP	
17 V	IV	
	LP	
18 V	IV	
	LP	
19 V	IV	
	LP	
20 V	IV	
	LP	
21 V	IV	
	LP	

- Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ – V_{alim} de 5 m/min

A tabela 13 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ com V_{alim} de 5 m/min. Os cordões de solda apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP apontou indícios de descontinuidades nas extremidades das soldas nas tensões de 15, 16, 17 e 18 V, que não foram consideradas. Nas tensões de 15 e 16 V foi observado estreitamento do cordão de solda. As tensões de 15 a 17 V apresentaram durante a execução das soldas uma menor formação de respingos e de escória e menor nível de ruídos. Nas tensões de 19, 20 e 21 V notou-se um aumento na formação dos respingos, escória, e no nível de ruídos, que indica um aumento na instabilidade do processo. A avaliação qualitativa mostrou que o processo apresentou melhor estabilidade para as tensões de 15, 16 e 17 V.

Tabela 13: IV e ensaio LP das soldas com Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ - V_{alim} de 5 m/min

Tensão	Ensaio	Ar+12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆ – V _{alim} 5 m/min
15 V	IV	
	LP	
16 V	IV	
	LP	
17 V	IV	
	LP	
18 V	IV	
	LP	
19 V	IV	
	LP	
20 V	IV	
	LP	
21 V	IV	
	LP	

4.1.2.1 Avaliação qualitativa dos resultados

- Foi possível realizar soldas com todos os gases, incluindo as misturas contendo propileno e obter cordões de solda que apresentaram adequado acabamento superficial e ausência de descontinuidades, com baixa geração de escória, respingo e ruídos;
- Os cordões de solda produzidos em tensões mais baixas apresentaram soldas mais estreitas e com maior reforço. Com o aumento do valor da tensão, os cordões ficaram largos e com menor reforço. Esse comportamento ocorre devido ao comprimento do arco elétrico que aumenta com o aumento da tensão, conforme descrito na literatura (Rezende *et al.*, 2011; Ribeiro, 2016; Polonine, 2018);
- Nas misturas de Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, observou-se um aumento na quantidade de respingos, escória e nível de ruídos devido ao aumento da tensão nas soldagens. Isso indica que a faixa operacional dessas misturas gasosas ocorreu em baixos valores de tensão, entre 15 a 19 V. Em misturas Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ pode-se observar que a quantidade de respingos, escória e nível de ruídos apresentaram o mesmo comportamento das misturas citadas anteriormente, com valores de tensão entre 15 a 18 V;
- Foi possível estabelecer uma faixa de tensão estável para todos os gases de proteção e V_{alim} utilizadas. A tabela 14 apresenta as faixas de tensão com melhor desempenho operacional definidas de acordo com a análise qualitativa.

Tabela 14: Faixa de tensão conforme análise qualitativa

Gás	U (V)	
	V_{alim}	V_{alim}
	4 m/min	5 m/min
Ar+25%CO ₂	15-17	15-17
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	15-17	17-19
Ar+12%CO ₂	15-17	16-18
Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	15-17	15-17

4.1.3 Análise da estabilidade do arco elétrico

A estabilidade do arco elétrico foi avaliada por meio do desempenho dos índices de desvio padrão de picos de corrente (DPPC), 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 (IV_{cc}). Abaixo, os resultados obtidos para cada gás de proteção.

- Ar+25%CO₂ - V_{alim} de 4 m/min

A tabela 15 e a figura 23 mostram o comportamento dos índices de estabilidade para as 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. A tensão de 16 V registrou os menores valores para os índices de estabilidade, exceto o índice DPAA que registrou o menor valor na tensão de 15 V. Os valores dos índices de estabilidade aumentaram a partir da tensão de 17 V até a tensão de 20 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostraram que a faixa operacional se encontra entre 15 a 17 V, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa.

Tabela 15: Índices de estabilidade Ar+25%CO₂ – V_{alim} de 4 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
Ar+ 25%CO ₂	4	15	30,2	0,8	0,6	0,339
		16	25,6	0,9	0,4	0,286
		17	37,5	2,4	0,7	0,624
		18	58,6	4,7	1,0	1,052
		19	72,7	6,3	1,1	1,208
		20	82,6	7,9	1,2	1,347
		21	82,5	8,1	1,2	1,347

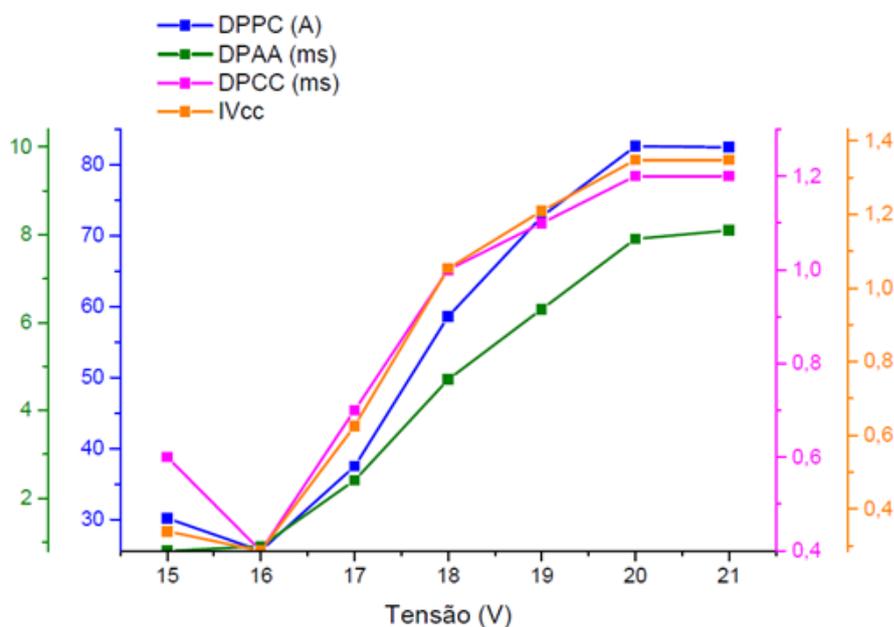


Figura 23: Variação dos índices de estabilidade em função da tensão de soldagem

- Ar+25%CO₂ - V_{alim} de 5 m/min

A tabela 16 e a figura 24 mostram o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+25%CO₂ com V_{alim} de 5 m/min. O intervalo de 15 a 17 V apresentou os menores valores para os índices de estabilidade. No entanto a tensão de 15 V apresentou o maior valor de DPCC registrado entre todas as tensões. A tensão de 16 V apresentou as melhores condições de trabalho e registrou os menores valores DPAA e IV_{cc}. Os valores dos índices de estabilidade aumentaram a

partir da tensão de 18 V até a tensão de 21 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostraram que a faixa operacional se encontra entre 15 a 17 V, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa.

Tabela 16: Índices de estabilidade Ar+25%CO₂ – V_{alim} de 5 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
Ar+ 25%CO ₂	5	15	43,8	1,5	1,2	0,598
		16	38,1	1,2	0,9	0,489
		17	37,8	1,7	0,8	0,539
		18	50,9	2,7	0,9	0,847
		19	62,2	3,5	1,0	1,081
		20	73,6	4,5	1,1	1,317
		21	77,5	5,1	1,1	1,431

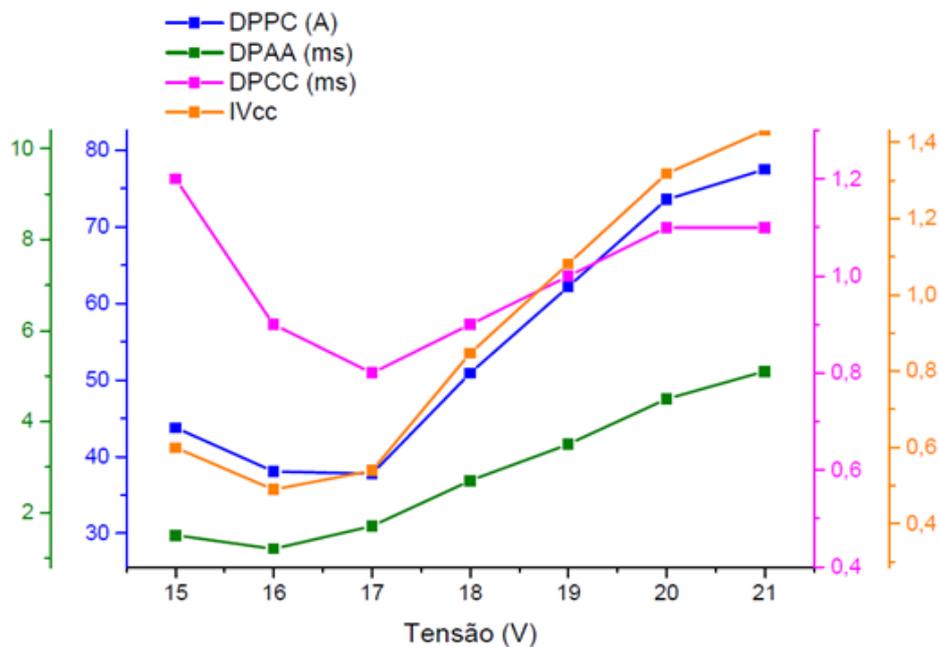


Figura 24: Variação dos índices de estabilidade em função da tensão de soldagem

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

A tabela 17 e a figura 25 mostram o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ com V_{alim} de 4 m/min. O intervalo de 15 a 17 V apresentou os menores valores para os índices de estabilidade. A tensão de 16 V apresentou as melhores condições de trabalho e registrou os menores valores DPPC e DPCC. Os valores dos índices de estabilidade aumentaram a partir da tensão de 18 V até a tensão de 20 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostraram que a faixa operacional se encontra entre 15 a 17 V, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa.

Tabela 17: Índices de estabilidade Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ V_{alim} de 4 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	4	15	37,9	3,3	0,7	1,088
		16	32,8	2,3	0,5	0,744
		17	45,0	2,2	0,8	0,730
		18	49,5	3,3	0,9	0,900
		19	57,4	4,3	0,9	0,987
		20	75,0	6,9	1,1	1,171
		21	62,6	6,3	1,1	1,11

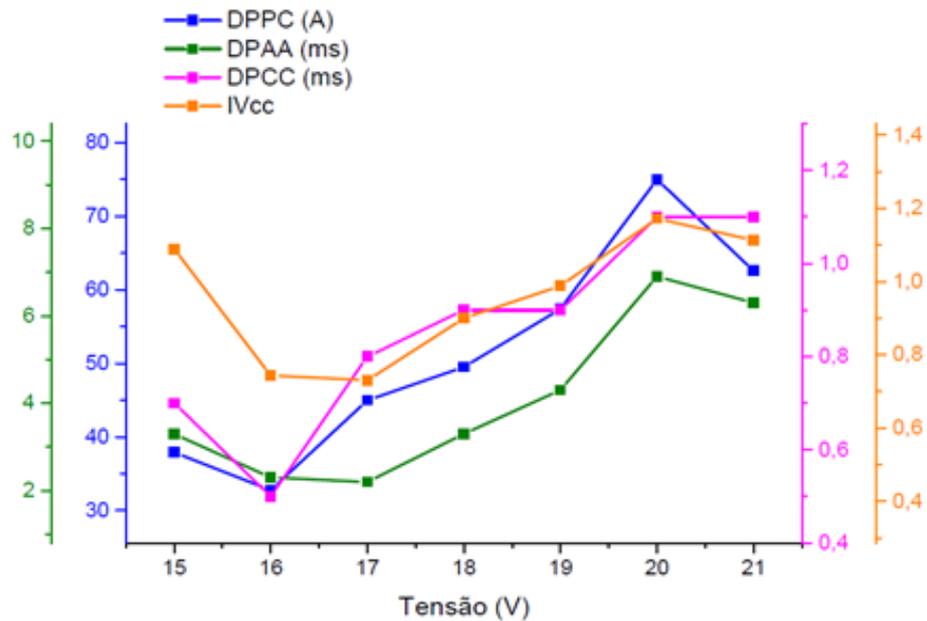


Figura 25: Variação dos índices de estabilidade em função da tensão de soldagem

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

A tabela 18 e a figura 26 mostram o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ com V_{alim} de 5 m/min. Como visto na análise qualitativa, não foi possível utilizar tensão menor que 17 V. O intervalo de 17 a 19 V apresentou os menores valores para os índices de estabilidade. A tensão de 18 V apresentou um comportamento estável para o processo. O valor dos índices de estabilidade aumentaram para a tensão de 20 e 21 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostram que a faixa operacional se encontra entre 17 a 19 V, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa.

Tabela 18: Índices de estabilidade Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ - V_{alim} de 5 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	5	17	33,5	1,3	0,8	0,507
		18	40,7	2,0	0,8	0,660
		19	50,6	2,9	0,9	0,876
		20	63,9	4,2	1,1	1,068
		21	64,4	4,6	1,2	1,134

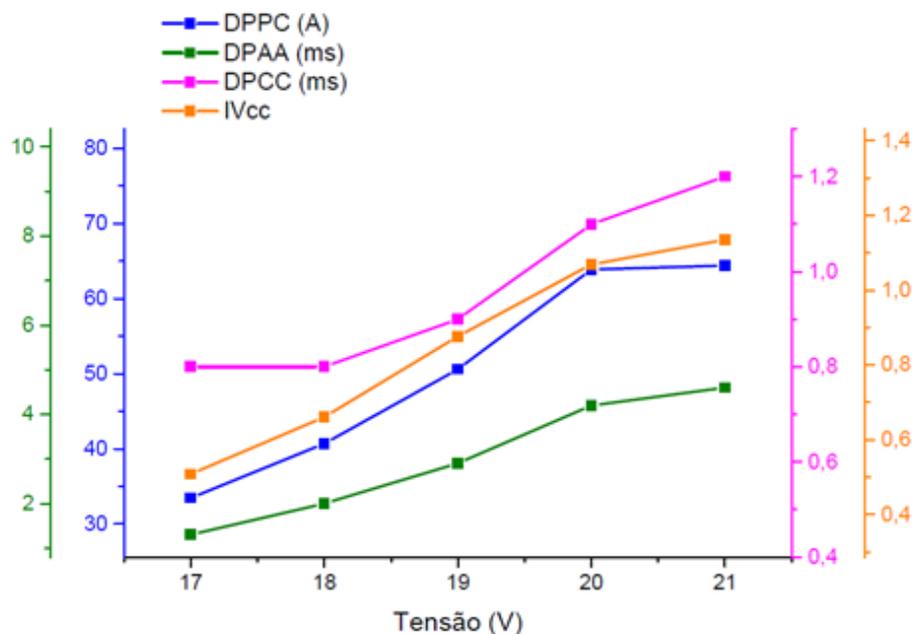


Figura 26: Variação dos índices de estabilidade em função da tensão de soldagem

- Ar+12%CO₂ - V_{alim} de 4 m/min

A tabela 19 e a figura 27 mostram o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+12%CO₂ com V_{alim} de 4 m/min. O intervalo de 15 a 17 V apresentou os menores valores para os índices de estabilidade. A tensão de 16 V apresentou as melhores condições de trabalho e registrou os menores valores de DPCC, DPAA e IV_{cc}. Os valores dos índices de estabilidade aumentaram a partir da tensão de 18 V até a tensão de 21 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostram que a faixa operacional se encontra entre 15 a 17 V, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa.

Tabela 19: Índices de estabilidade Ar+12%CO₂ – V_{alim} de 4 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
Ar+ 12%CO ₂	4	15	29,5	1,2	0,7	0,446
		16	27,6	1,0	0,6	0,373
		17	30,3	3,1	0,6	0,642
		18	45,1	4,7	0,8	0,849
		19	53,1	9,2	1,1	1,101
		20	63,7	10,4	1,2	0,978
		21	76,0	10,4	1,2	1,078

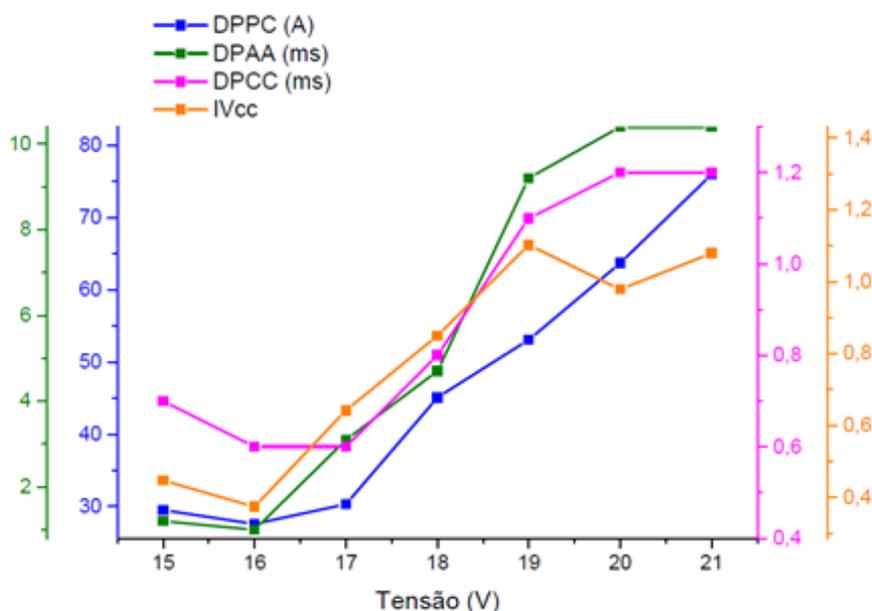


Figura 27: Variação dos índices de estabilidade em função da tensão de soldagem

- Ar+12%CO₂ - V_{alim} de 5 m/min

A tabela 20 e a figura 28 mostram o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+12%CO₂ com V_{alim} de 5 m/min. O intervalo de 15 a 19 V apresentou os menores valores para os índices de estabilidade. A tensão de 17 V apresentou as melhores condições de trabalho e registrou os menores valores de DPCC, DPAA e IV_{cc}. O valor dos índices de estabilidade aumentaram para a tensão

de 20 e 21 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostram que a faixa operacional se encontra entre 16 a 18 V, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa.

Tabela 20: Índices de estabilidade Ar+12%CO₂ – V_{alim} de 5 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
Ar+ 12%CO ₂	5	15	33,9	1,4	0,9	0,516
		16	30,0	1,2	0,7	0,421
		17	29,0	1,0	0,7	0,372
		18	30,1	1,5	0,8	0,475
		19	33,5	1,8	0,8	0,521
		20	51,4	4,0	1,2	0,992
		21	61,5	3,8	1,2	1,026

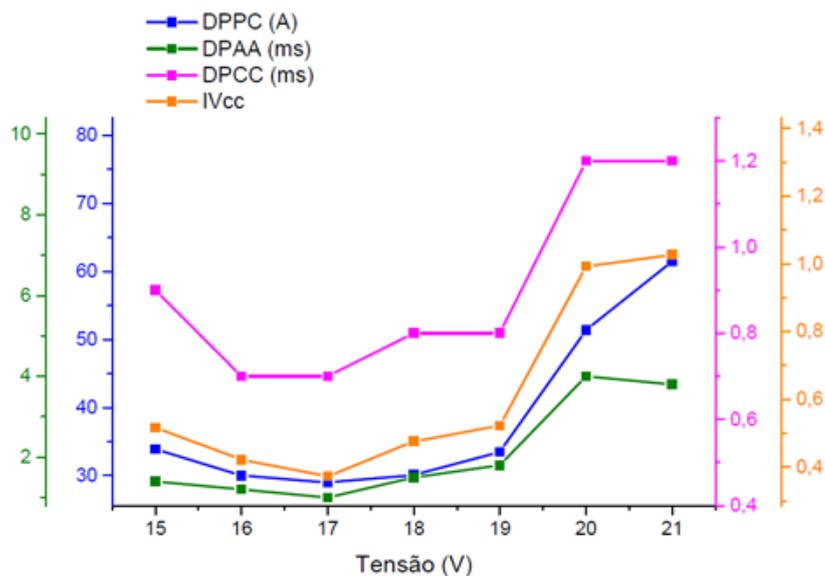


Figura 28: Variação dos índices de estabilidade em função da tensão de soldagem

- Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ - V_{alim} de 4 m/min

A tabela 21 e a figura 29 mostram o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ com de V_{alim} de 4 m/min. O

intervalo de 15 a 17 V apresentou os menores valores para os índices de estabilidade. A tensão de 16 V apresentou as melhores condições de trabalho e registrou o menor valor dos índices. Os índices de estabilidade aumentaram a partir da tensão de 18 V até a tensão de 21 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostram que a faixa operacional se encontra entre 15 a 17 V, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa.

Tabela 21: Índices de estabilidade Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ - V_{alim} de 4 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	4	15	29,5	1,2	0,7	0,446
		16	27,6	1,0	0,6	0,373
		17	40,4	3,3	0,8	0,735
		18	60,0	4,2	1,1	0,994
		19	67,4	7,2	1,2	1,111
		20	62,4	8,6	1,1	1,037
		21	78,8	8,8	1,2	1,198

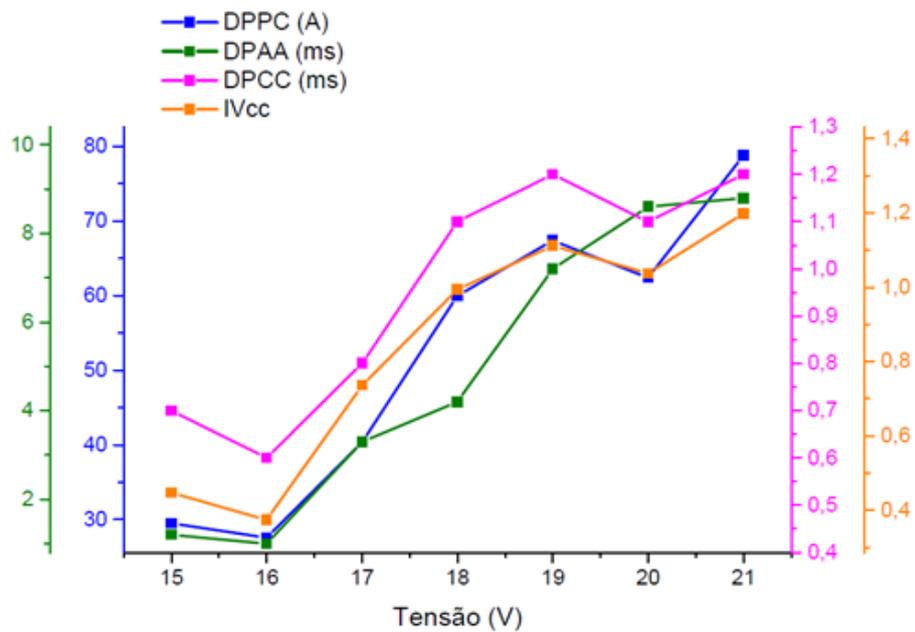


Figura 29: Variação dos índices de estabilidade em função da tensão de soldagem

- Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ - V_{alim} de 5 m/min

A tabela 22 e a figura 30 mostram o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ com V_{alim} de 5 m/min. O intervalo de 15 a 17 V apresentou os menores valores para os índices de estabilidade. A tensão de 16 V apresentou as melhores condições de trabalho e registrou os menores valores de DPAA e IV_{cc}. Os valores dos índices de estabilidade aumentaram a partir da tensão de 18 V até a tensão de 21 V, sendo um indicativo do aumento da instabilidade do processo. Os índices de estabilidade mostram que a faixa operacional se encontra entre 15 a 17 V, o que está de acordo com os resultados da avaliação qualitativa.

Tabela 22: Índices de estabilidade Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ - V_{alim} de 5 m/min

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	5	15	34,2	1,3	1,1	0,467
		16	33,0	1,1	1,0	0,463
		17	32,8	1,9	0,8	0,564
		18	46,1	3,4	1,0	0,847
		19	57,6	4,1	1,1	1,030
		20	65,8	4,8	1,2	1,145
		21	68,0	6,1	1,3	1,119

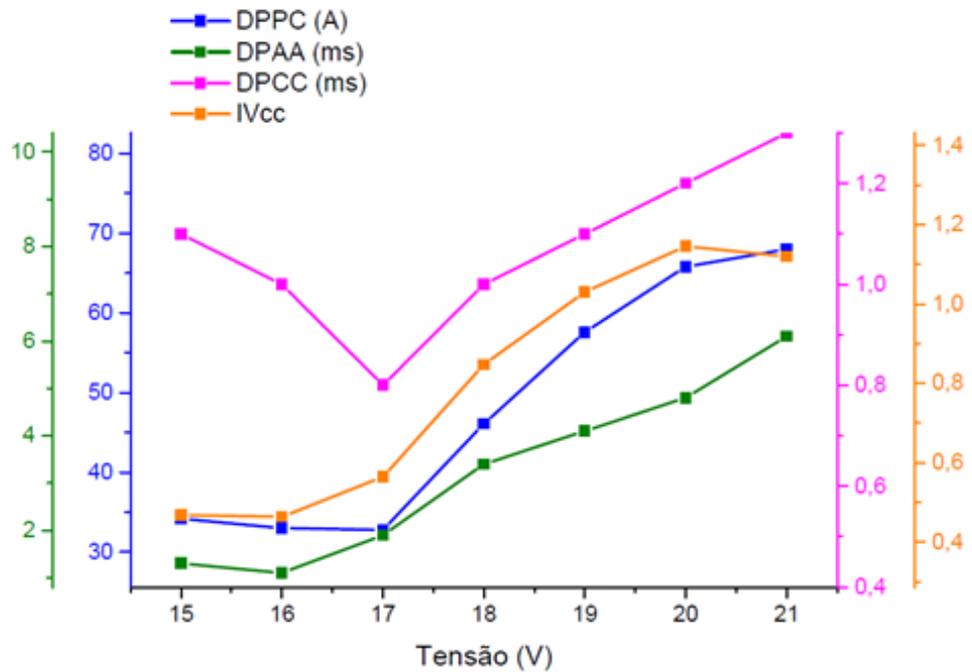


Figura 30: Variação dos índices de estabilidade em função da tensão de soldagem.

4.1.4 Determinação das faixas operacionais

Com base na análise qualitativa dos cordões de solda e nos resultados dos índices de estabilidade foi possível estabelecer uma faixa operacional de trabalho para todos os gases de proteção e V_{alim} . Conforme mostra a tabela 23 foi selecionado um valor médio da tensão para soldar os corpos de prova de cada mistura gasosa na etapa 2.

Tabela 23: Faixa operacional e tensão de trabalho

Gás	V_{alim} (m/min)	Faixa operacional (V)	Tensão de trabalho (V)
Ar+25%CO ₂	4	15-17	16
	5	15-17	16
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	4	15-17	16
	5	17-19	18
Ar+12%CO ₂	4	15-17	16
	5	16-18	17
Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	4	15-17	16
	5	15-17	16

Ao avaliar as faixas de tensão de trabalho para os gases de proteção, pode-se observar que:

- A adição de 0,6% de C₃H₆ à mistura de Ar+25%CO₂ com velocidade de alimentação de 5 m/min, resultou na mudança da faixa de tensão de 15 a 17 V para 17 a 19 V, provocando um deslocamento de 2 V na faixa operacional do processo. Costa (2019) e Polonine (2018) também relatam em seus trabalhos esse deslocamento de tensão na faixa operacional.
- A adição de 0,4% de C₃H₆ à mistura de Ar+12%CO₂ com velocidade de alimentação de 5 m/min, reduziu a faixa de tensão de 16 a 18 V para 15 a 17 V. Com base no trabalho de Ribeiro (2016), este resultado pode ser atribuído ao fenômeno de dissociação e recombinação molecular do C₃H₆, que sofre o processo semelhante à combustão liberando alta energia para o arco elétrico num processo exotérmico. Com o aumento do calor do arco elétrico torna-se possível executar a solda em uma tensão menor. Outra hipótese é a concentração do Ar no gás com 12%CO₂ ser maior que no gás com 25%CO₂, provocando um aumento no potencial de ionização e com consequência uma redução na tensão de soldagem.

- De modo geral, pode-se observar que a diferença de tensão nos gases proteção convencionais e ao adicionar o C_3H_6 em ambos os gases de proteção, na V_{alim} de 5 m/min não foi significativo. A faixa operacional de tensão variou em um pequeno intervalo de deslocamento.

4.1.5 Considerações finais da Etapa 1

Os parâmetros encontrados foram adequados para realizar soldas utilizando gases de proteção convencional e com adição de C_3H_6 , com dois valores de V_{alim} e obter cordões de solda de bom aspecto e sem descontinuidade, com baixa geração de escória, respingos e ruídos.

As análises qualitativas dos cordões de solda e da estabilidade do arco elétrico possibilitaram a determinação das faixas operacionais e pontos de trabalho para cada um dos gases.

De forma geral, a adição de 0,6% C_3H_6 à mistura de $Ar+25\%CO_2$ produziu um aumento dos índices de estabilidade, o que significa que a adição de C_3H_6 não foi efetiva na melhoria da estabilidade do processo.

A adição de 0,4% de C_3H_6 à mistura de $Ar+12\%CO_2$ não provocou alteração significativa no valor dos índices de estabilidade, mantendo a estabilidade no processo.

4.2 Etapa 2

Esta etapa teve como objetivo avaliar e comparar os efeitos da adição do propileno nos gases convencionais. Foram realizadas novas soldas utilizando os parâmetros determinados na etapa 1. Os valores médios de corrente variaram de 175 a 195 A para a V_{alim} de 4 m/min, e 215 a 223 A para a V_{alim} de 5 m/min.

4.2.1 Análise Qualitativa

Após a execução dos cordões de solda sobre as chapas, foram realizados a Inspeção Visual (IV), ensaio de Líquido Penetrante (LP) e a avaliação quanto a produção de respingos, escória e ruídos realizados durante a soldagem. Abaixo os

resultados obtidos comparando o desempenho do gás convencional em relação ao gás com adição de C_3H_6 em cada V_{alim} .

- Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

A tabela 24 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ com V_{alim} de 4 e 5 m/min. As soldas apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP não revelou indícios de descontinuidades nos cordões de solda. Foi observado um estreitamento dos cordões de solda ao usar a tensão de 16 V. Durante a execução das soldas foi possível perceber que as quantidades de respingos e escória gerados foram relativamente baixas, com nível de ruídos uniforme.

Ao comparar os resultados obtidos pelas soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, não foi possível perceber alterações significativas causadas pela adição de C_3H_6 . As quantidades de escória e respingos gerados pelas soldas foram visualmente semelhantes para ambos os 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 significativamente a estabilidade do processo, sendo possível produzir soldas para ambos os valores de V_{alim} utilizados.

Tabela 24: IV e ensaio LP das soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

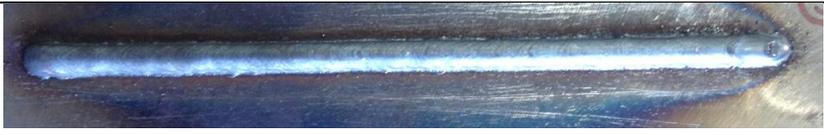
Gás	V _{alim} (m/min)	Tensão (V)	Ensaio
Ar + 25%CO ₂	4	16	
			
Ar + 25%CO ₂	5	16	
			
Ar+25%CO ₂ + 0,6%C ₃ H ₆	4	16	
			
Ar+25%CO ₂ + 0,6%C ₃ H ₆	5	18	
			

- Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

A tabela 25 mostra os resultados dos cordões de solda utilizando Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ com V_{alim} de 4 e 5 m/min. As soldas apresentaram aspecto visual uniforme. O ensaio de LP apontou indício de descontinuidade na extremidade da solda Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ com V_{alim} 5m/min, que não foi considerada. Na mistura de Ar+12%CO₂ com V_{alim} de 4m/min foi observado um estreitamento do cordão de solda e rugosidade na superfície do cordão. Durante a execução das soldas foi possível perceber que as quantidades de respingos e escória gerados foram próximas, com nível de ruídos uniforme.

Ao comparar os resultados obtidos pelas soldas com Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆, não foi possível perceber alterações significativas causadas pela adição de C₃H₆. Os cordões de solda apresentaram aparência e formato semelhantes. Também não foram percebidas alterações nas quantidades de escória e respingos gerados. Para ambos os gases foi possível produzir soldas de qualidade, sem causar alterações na estabilidade do processo.

Tabela 25: IV e ensaio LP das soldas com Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

Gás	V _{alim} (m/min)	Tensão (V)	Ensaio
Ar + 12%CO ₂	4	16	
			
Ar + 12%CO ₂	5	17	
			
Ar+12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆	4	16	
			
Ar+12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆	5	16	
			

4.2.1.1 Avaliação qualitativa dos resultados

- De modo geral, obteve-se cordões de solda de boa aparência e sem descontinuidades com formação de respingos e escória relativamente baixa, e uma produção de ruídos uniforme. Isso indicou que as soldas foram realizadas dentro da faixa de estabilidade do processo, com os parâmetros de soldagem selecionados na etapa 1.
- A adição de C_3H_6 nos gases convencionais não produziu alterações significativas na estabilidade dos cordões de solda, isentos de descontinuidades.

4.2.2 Análise da estabilidade do arco elétrico

A seguir são apresentados os resultados obtidos dos índices de estabilidade calculados (DPPC, DPAA, DPCC, IV_{cc}) para cada gás de proteção e V_{alim} .

- $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$

A tabela 26 mostra o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$ com V_{alim} de 4 e 5 m/min. De uma forma geral, observa-se que a adição de C_3H_6 resultou em um aumento dos valores dos índices de estabilidade nas duas velocidades de alimentação, evidenciando um aumento na instabilidade no processo.

Nota-se que picos de corrente inadequados podem ser identificados nos tempos de curto circuito, que tende a apresentar maior DPCC (Dutra e Baixo, 1995; Roca *et al.*, 2005; Scotti e Ponomarev, 2014).

O aumento nos índices de DPAA e DPCC tende a estar relacionado com irregularidades na transferência metálica.

Vale ressaltar que, como foi visto na etapa 1, para manter a estabilidade no processo foi necessário um ajuste na tensão nas soldas produzidas na V_{alim} de 5 m/min. Por isso, utilizou tensão de 16 V com $Ar+25\%CO_2$, e 18 V com $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$.

Esses resultados estão de acordo com o trabalho de Polonine (2018), que ao adicionar C_3H_6 no $Ar+25\%CO_2$ com V_{alim} de 5 m/min também observou uma pequena elevação dos valores dos índices de estabilidade. Costa (2019) relata em seu trabalho que a adição de C_3H_6 no $Ar+25\%CO_2$ com V_{alim} de 4 m/min apresentou um aumento dos valores dos índices de estabilidade e ao soldar na V_{alim} de 5 m/min obteve uma redução dos valores desses índices. Entretanto, os autores citados utilizaram parâmetros diferentes dos aqui utilizados.

Tabela 26: Índices de estabilidade
 $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$ - V_{alim} de 4 e 5 m/min

V_{alim}	Gás	Amostra	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV_{cc}
4 m/min	$Ar+25\%CO_2$	1	16	32,4	1,2	0,7	0,438
		2	16	31,9	1,1	0,7	0,428
		média	16	32,1	1,1	0,7	0,433
	$Ar+25\%CO_2$ + $0,6\%C_3H_6$	1	16	69,6	7,1	2,9	1,639
		2	16	77,7	9,0	3,7	1,807
		média	16	73,6	8,0	3,3	1,723
5 m/min	$Ar+25\%CO_2$	1	16	45,1	1,3	1,1	0,513
		2	16	37,3	1,1	1,0	0,436
		média	16	41,2	1,2	1,0	0,475
	$Ar+25\%CO_2$ + $0,6\% C_3H_6$	1	18	48,4	1,9	1,1	0,653
		2	18	58,8	3,3	1,8	1,041
		média	18	53,6	2,6	1,4	0,846

A figura 31 mostra o comparativo dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ com V_{alim} de 4 e 5 m/min.

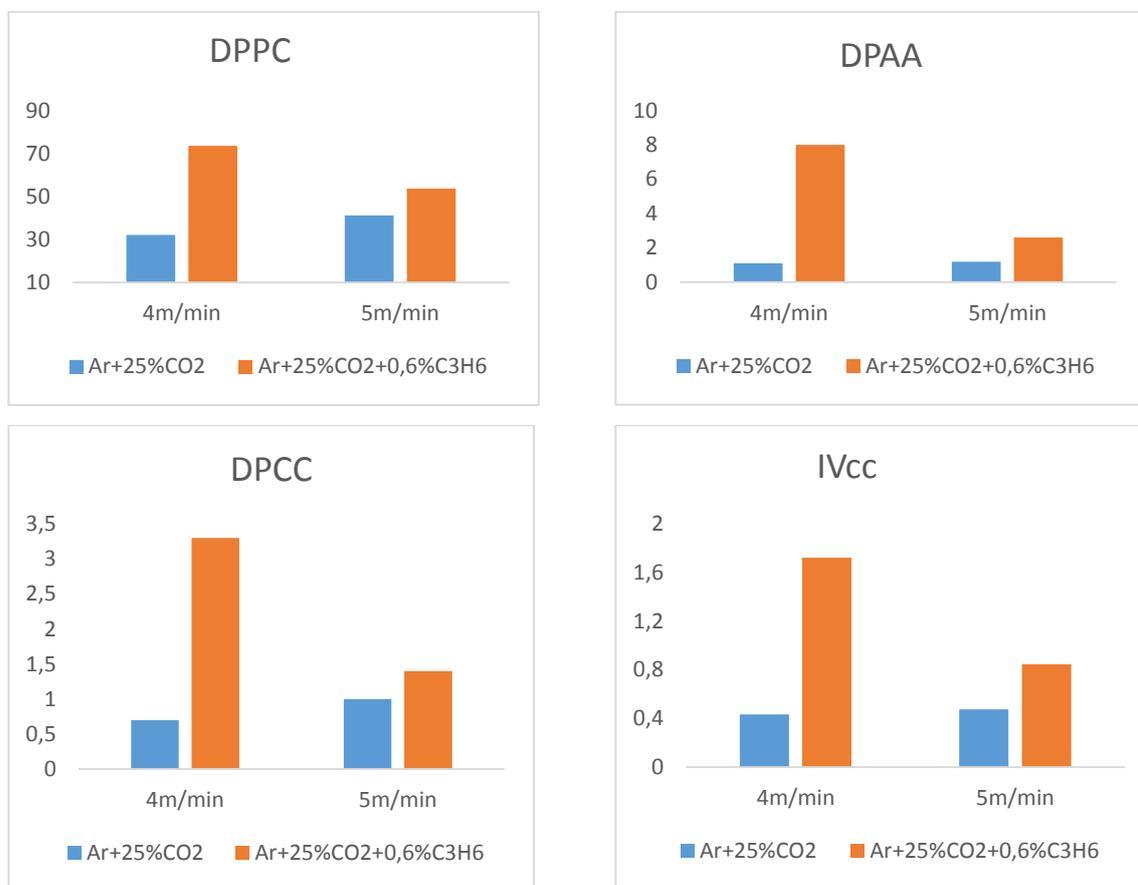


Figura 31: Gráfico dos índices de estabilidade $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+0,6\%\text{C}_3\text{H}_6$ - V_{alim} de 4 e 5 m/min

- $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$

A tabela 27 mostra o comportamento dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$ com V_{alim} de 4 e 5 m/min.

A adição de C_3H_6 na V_{alim} de 4 m/min resultou em uma diminuição dos valores dos índices de estabilidade. Na V_{alim} de 5 m/min houve um pequeno aumento, sendo que os valores dos índices de estabilidade se mantiveram relativamente próximos. Deve-se considerar que as soldas produzidas com $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2$ na V_{alim} de 5 m/min utilizaram tensão de 17 V, enquanto com $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$ foi utilizada uma tensão de 16 V. Nota-se que foi possível realizar a solda com uma V_{alim} maior, utilizando uma tensão menor.

De maneira geral, a adição de C₃H₆ ao Ar+12%CO₂ foi significativa. Visto que os valores dos índices de estabilidade reduziram ou se mantiveram próximos. Os resultados estão de acordo com o trabalho de Ribeiro (2016), que relatou que a adição de C₃H₆ ao Ar+12%CO₂ resultou em uma melhora na estabilidade do processo.

Tabela 27: Índices de estabilidade
Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ - V_{alim} de 4 e 5 m/min

V _{alim}	Gás	Amostra	U (V)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
4 m/min	Ar+12%CO ₂	1	16	58,8	4,7	2,0	1,122
		2	16	54,5	6,8	1,5	1,165
		média	16	56,6	5,7	1,7	1,143
	Ar+12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆	1	16	33,4	2,9	0,6	0,631
		2	16	35,5	3,2	0,7	0,701
		média	16	34,4	3,0	0,6	0,666
5 m/min	Ar+12%CO ₂	1	17	33,0	1,2	0,8	0,391
		2	17	29,7	1,2	0,7	0,399
		média	17	31,3	1,2	0,7	0,395
	Ar+12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆	1	16	32,6	1,2	0,9	0,423
		2	16	39,4	2,2	1,1	0,638
		média	16	36,0	1,7	1,0	0,531

A figura 32 mostra o comparativo dos índices de estabilidade para as soldas que utilizaram Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ com V_{alim} de 4 e 5 m/min.

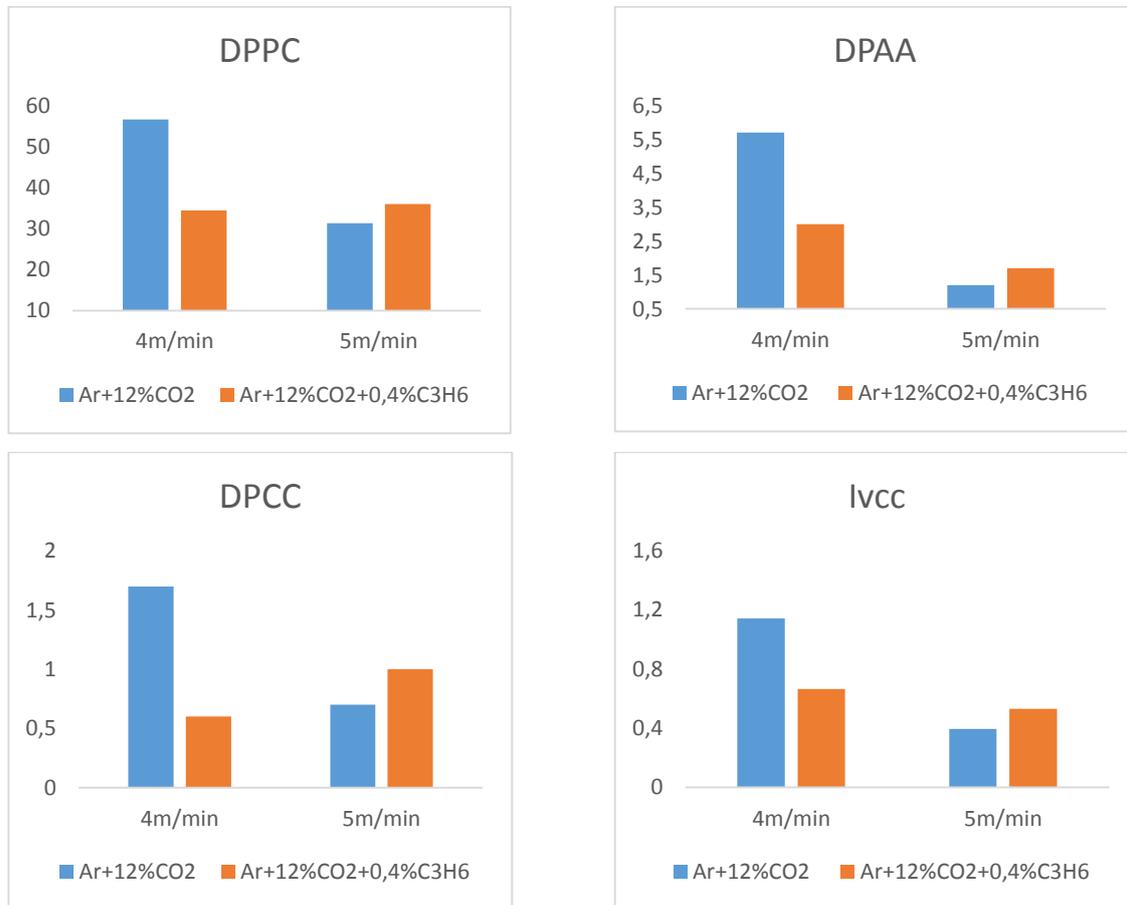


Figura 32: Gráfico dos índices de estabilidade Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ – V_{alim} de 4 e 5 m/min

Ao analisar os sinais elétricos observou-se que:

- De acordo com os parâmetros utilizados na pesquisa, os resultados da análise da estabilidade do arco estão de acordo com os resultados da análise qualitativa, em que todos os cordões de solda apresentaram bom acabamento e bom desempenho operacional. Sendo um indicativo que é possível obter soldas com uma estabilidade adequada utilizando gases com adição de C₃H₆.
- A adição de C₃H₆ ao Ar+25%CO₂ reduziu a estabilidade do processo, apresentando um aumento dos valores dos índices de estabilidade nas duas V_{alim}.

- A adição de C₃H₆ ao Ar+12%CO₂ na V_{alim} de 4 m/min resultou em uma maior estabilidade do processo, com redução nos valores dos índices. Para a V_{alim} de 5 m/min, a adição de C₃H₆ não provocou alterações significativas na estabilidade do processo, sendo que foi utilizada uma tensão de 16 V com Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ e 17 V com Ar+12%CO₂.

4.2.3 Taxa de respingo e escória

Os respingos e a escória gerados durante a soldagem dos cordões de solda foram coletados e armazenados de acordo com o gás de proteção utilizado. A tabela 28 e a figura 33 mostram as taxas de respingo e escória.

Tabela 28: Taxa de respingo e escória

Gás de proteção	Escória (g)	Respingo (g)	Tempo de soldagem (min)	Taxa de escória (g/min)	Taxa de respingo (g/min)
Ar+25%CO ₂	0,1864	2,1756	2,90	0,0642	0,7502
Ar+25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	0,2913	2,3334	2,52	0,1155	0,9259
Ar+12%CO ₂	0,1757	1,3826	2,80	0,0627	0,4937
Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	0,1334	1,2850	2,70	0,0494	0,4759

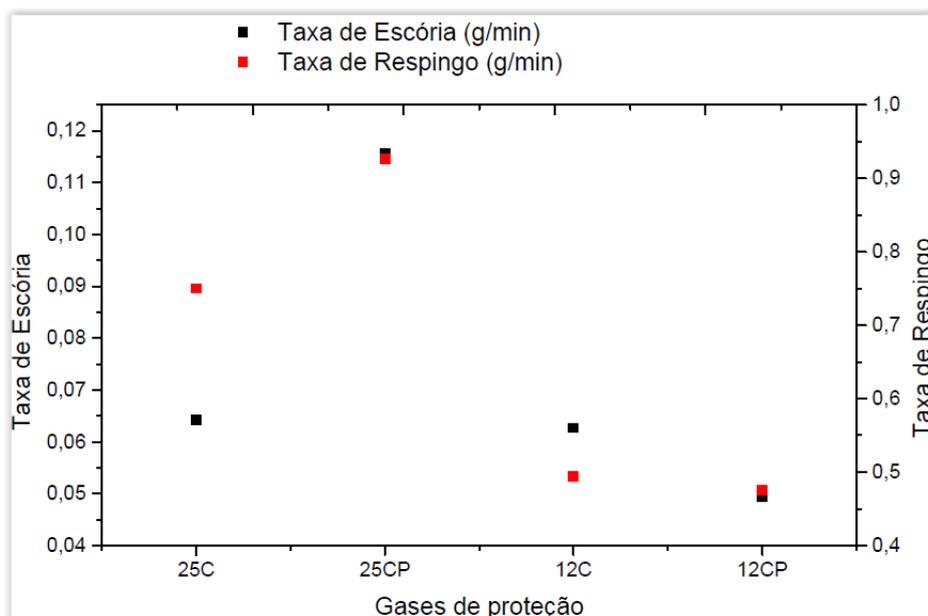


Figura 33: Gráfico das taxas de respingo e escória
 25C – Ar+25%CO₂, 25CP – Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, 12C – Ar+12%CO₂,
 12CP – Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

- Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

As soldas realizadas com Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ apresentaram as maiores quantidades de respingos e escória. A adição de C₃H₆ ao Ar+25%CO₂ resultou no aumento das quantidades de escória e respingos gerados. A taxa de escória aumentou de 0,0642 g/min para 0,1155 g/min e a taxa de respingos de 0,7502 g/min para 0,9259 g/min. Esse aumento nas taxas de escória e respingo foi atribuído a adição de C₃H₆, que causou uma redução do potencial de oxidação do Ar+25%CO₂. Dessa forma, considera-se que a mistura convencional Ar+25%CO₂ possui um potencial de oxidação considerado adequado para a realização da soldagem de aço carbono, sendo que uma variação nesse potencial pela adição de 0,6%C₃H₆ pode ter provocado alteração na estabilidade do processo (Groetelaars, 2007).

As quantidades de escória e respingos gerados estão de acordo com o observado durante a análise qualitativa. Os resultados também estão de acordo com a análise dos sinais elétricos que obteve um aumento no valor dos índices de estabilidade ao adicionar C₃H₆ no gás convencional, proporcionando uma instabilidade no processo e provocando uma maior quantidade de respingos gerados.

Os resultados estão de acordo com o observado por Ribeiro (2016), Polonine (2018) e Costa (2019) em seus respectivos trabalhos, que perceberam um aumento

dos níveis de respingos e escória como consequência da adição de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$.

- $Ar+12\%CO_2$ e $Ar+12\%CO_2+0,4\%C_3H_6$

A adição de C_3H_6 ao $Ar+12\%CO_2$ resultou em menor quantidade de escória e respingos gerados. A taxa de escória reduziu de 0,0627 g/min para 0,0494 g/min e a taxa de respingos de 0,4937 g/min para 0,4759 g/min. Esta redução foi atribuída a dissociação e recombinação molecular do C_3H_6 , que libera alta energia para o arco elétrico num processo exotérmico. A decomposição do hidrocarboneto C_3H_6 resulta na liberação H_2 , que atua como redutor, reduzindo as quantidades de escória e respingos gerados (Tusek e Suban, 2000).

As quantidades de escória e respingos gerados estão de acordo com o observado durante a análise qualitativa, em que foi possível notar que as mesmas eram reduzidas. Os resultados também estão de acordo com a análise dos sinais elétricos que mostrou que a adição de C_3H_6 melhorou a estabilidade do processo.

Ribeiro (2016) relata em seu trabalho, que percebeu uma redução dos níveis de respingos e escória como consequência da adição de C_3H_6 ao $Ar+12\%CO_2$.

Pode-se observar que:

- As soldas realizadas com $Ar+12\%CO_2$ e $Ar+12\%CO_2+0,4\%C_3H_6$ apresentaram menor quantidade de respingos e escória em relação ao $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$. Isso ocorre devido à redução da concentração de CO_2 conforme mostra Liskevych (2010) em seu trabalho, que relatou que a quantidade de respingo e escória cresce com o aumento do teor de CO_2 na proteção gasosa.
- Os resultados obtidos estão de acordo com a análise qualitativa, que durante a soldagem observou que as quantidades de respingos e escória gerados foram relativamente baixas.
- A adição de C_3H_6 foi positiva para o $Ar+12\%CO_2$, pois obteve uma maior estabilidade do processo, com uma redução dos respingos e escória gerados.

Por outro lado, a adição de C_3H_6 prejudicou a estabilidade em relação ao processo com o $Ar+25\%CO_2$, gerando um aumento na formação de respingos e escória.

4.2.4 Taxa de deposição (TD)

A tabela 29 mostra o peso do corpo de prova antes e depois da soldagem, o tempo de soldagem, a quantidade de metal depositado e a taxa de deposição calculada a partir desses dados.

A figura 34 mostra um comparativo da taxa de deposição entre os gases, tendo como base os valores das médias.

Tabela 29: Valores da taxa de deposição

Gás	V_{alim} (m/min)	Amostra	Peso antes da solda (g)	Peso após a solda (g)	Tempo de solda (s)	Metal depositado (g)	Taxa de deposição (kg/h)
Ar+25%CO ₂	4	1	476,6	498,5	34,24	21,9	2,30
		2	479,8	502,8	36,21	23,0	2,29
		média	478,2	500,6	35,22	22,4	2,29
	5	1	489,8	513,8	33,84	24,0	2,55
		2	472,5	498,1	35,06	25,6	2,63
		média	481,1	505,9	34,45	24,8	2,59
Ar+25%CO ₂ + 0,6%C ₃ H ₆	4	1	474,9	497,3	37,92	22,4	2,13
		2	468,8	493,0	38,44	24,2	2,27
		média	471,8	495,1	38,18	23,3	2,20
	5	1	478,5	506,5	37,26	28,0	2,70
		2	470,8	498,0	37,93	27,2	2,58
		média	474,6	502,2	37,59	27,6	2,64
Ar+12%CO ₂	4	1	481,3	505,4	38,42	24,1	2,26
		2	477,8	496,3	38,09	18,5	1,75
		média	479,5	500,8	38,25	21,3	2,00
	5	1	475,7	503,7	38,22	28,0	2,64
		2	474,8	502,7	37,37	27,9	2,69
		média	475,2	503,2	37,79	27,9	2,66
Ar+12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆	4	1	477,6	497,8	36,88	20,2	1,97
		2	470,0	489,9	37,59	19,9	1,90
		média	473,8	493,8	37,23	20,0	1,93
	5	1	479,0	507,3	37,73	28,3	2,70
		2	492,7	520,2	32,99	27,5	3,00
		média	485,8	513,8	35,36	27,9	2,85

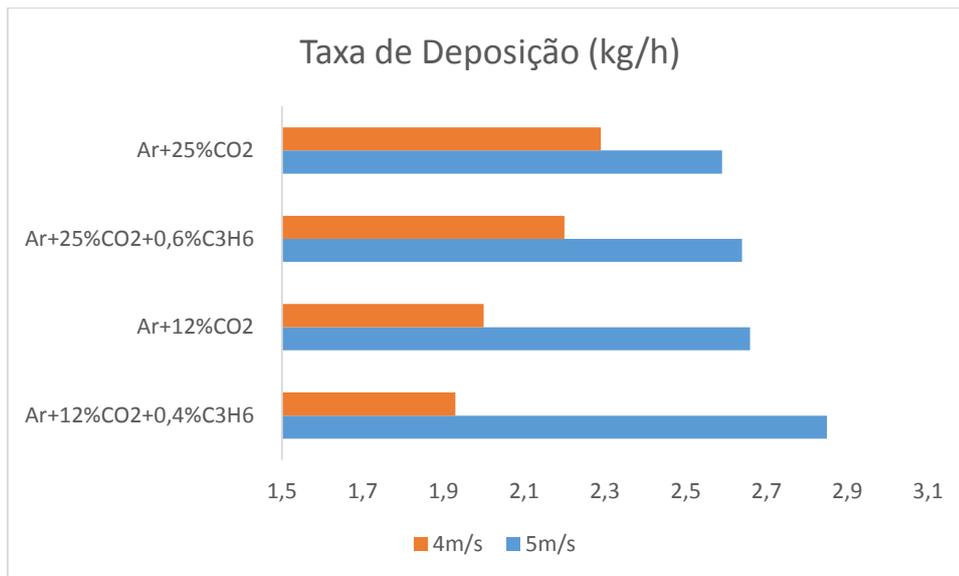


Figura 34: Comparativo das médias da taxa de deposição

- Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

A tabela 29 e figura 34 mostram a variação dos valores da TD para as soldas que utilizaram Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆. Pode-se observar que a adição de C₃H₆ no Ar+25%CO₂ não alterou significativamente no valor da taxa de deposição, mantendo-se praticamente constante. Com relação a V_{alim} observou-se uma redução da TD na V_{alim} de 4 m/min e um ligeiro aumento na V_{alim} de 5m/min.

Em seus trabalhos Polonine (2018) e Costa (2019) relatam uma diminuição da TD após a adição de C₃H₆, que foi relacionado à maior quantidade de respingos gerados.

- Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

A tabela 29 e figura 34 mostram a variação dos valores da TD para as soldas que utilizaram Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. Pode-se observar que a adição de C₃H₆ no gás de proteção Ar+12%CO₂ na V_{alim} de 4 m/min proporcionou uma leve diminuição na taxa de deposição. Na V_{alim} de 5 m/min a adição de C₃H₆ proporcionou uma maior taxa de deposição em relação ao gás convencional.

Ressalta-se que a coleta de respingo e escória durante a soldagem não considerou a diferença na V_{alim} . Sendo assim, foi atribuído a V_{alim} de 5 m/min a menor quantidade de respingos e escória gerados, pois ao soldar com esta velocidade de alimentação obteve um aumento considerável na TD.

Ribeiro (2016) descreve em seu trabalho que a TD das soldas em Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ foram semelhantes das soldas em Ar+12CO₂.

De forma geral, observou-se que:

- As soldas realizadas na V_{alim} 5 m/min possuem valores maiores de TD que as soldas realizadas na V_{alim} 4 m/min. Isso ocorre devido ao aumento da V_{alim} , corresponder a um aumento na corrente de soldagem, e maior quantidade de metal de adição é fornecida (Scotti e Ponomarev, 2014).
- Na V_{alim} 4 m/min a TD das soldas em atmosferas com adição de C₃H₆ foram ligeiramente menores se comparadas às soldas executadas nas atmosferas convencionais.
- Na V_{alim} 5 m/min houve um pequeno aumento na TD das soldas ao adicionar C₃H₆ nas atmosferas convencionais. Sendo este aumento melhor observado no Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆.

4.2.5 Geometria do cordão de solda

A análise da geometria dos cordões de solda foi feita em todas as amostras de cada gás de proteção e V_{alim} . Abaixo a descrição dos resultados obtidos.

- Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

A figura 35 mostra a macrografia dos cordões de solda em cada V_{alim}.

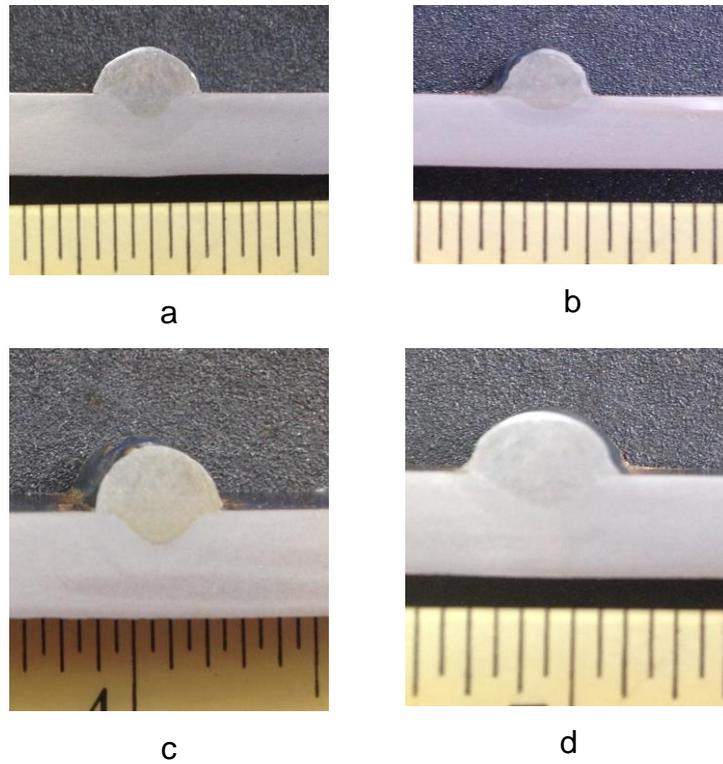


Figura 35: Macrografia dos cordões de solda.

- a) Ar+25%CO₂-V_{alim} 4 m/min, b) Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆-V_{alim} 4 m/min,
c) Ar+25%CO₂-V_{alim} 5 m/min, d) Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆-V_{alim} 5 m/min

Na tabela 30 pode ser observada as dimensões dos cordões de solda: largura (L), reforço (R) e penetração (P).

Tabela 30: Dimensões dos cordões de solda

Gás	V _{alim} (m/min)	CP	R (mm)	L (mm)	P (mm)
Ar+25%CO ₂	4	25C4-1	3,6	7,1	1,9
		25C4-2	3,5	7,8	2,3
		média	3,5	7,5	2,1
	5	25C5-1	3,5	7,2	2,1
		25C5-2	4,0	7,4	1,9
		média	3,7	7,3	2,0
Ar+25%CO ₂ + 0,6%C ₃ H ₆	4	25P4-1	4,0	7,1	1,8
		25P4-2	4,3	7,9	1,5
		Média	4,1	7,5	1,6
	5	25P5-1	3,8	7,8	2,6
		25P5-2	4,2	7,6	2,1
		média	4,0	7,7	2,3

A figura 36 mostra a variação das médias das dimensões dos cordões de solda, comparando o desempenho do gás convencional com a adição do C₃H₆.

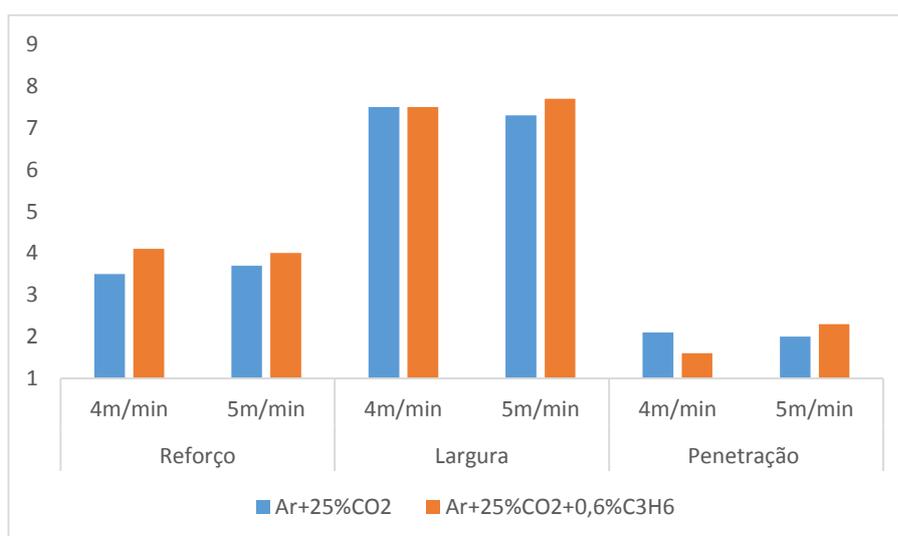


Figura 36: Média das dimensões dos cordões de solda

Considerando os resultados obtidos nas soldas realizadas com V_{alim} de 4 m/min foi possível perceber que a adição de C_3H_6 causou um pequeno aumento no reforço, redução na penetração e sem alteração na largura. Este comportamento foi atribuído ao menor rendimento do processo devido a adição de C_3H_6 , que resultou em maior geração de respingos e escória e uma ligeira redução da TD.

As soldas realizadas com V_{alim} de 5 m/min apresentaram um pequeno aumento nas dimensões dos cordões de solda após a adição de C_3H_6 . O aumento no valor da largura do cordão de solda pode estar relacionado a diferença de tensão que passou de 16 V (mistura Ar+25%CO₂) para 18 V (mistura Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆). De acordo com Modenesi (2004), o aumento da tensão resulta em um cordão de solda com maior largura. Em relação ao aumento no valor da penetração, pode ser atribuído a maior troca térmica decorrente da adição do C_3H_6 , pois segundo Liskevich (2010) o aumento do teor de gases com maior troca térmica pode aumentar a penetração.

De modo geral, a adição de C_3H_6 resultou no aumento das dimensões do cordão de solda. Obtendo uma maior penetração nas soldas realizadas com a V_{alim} de 5 m/min.

- Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

A figura 37 mostra a macrografia dos cordões de solda em cada V_{alim}.

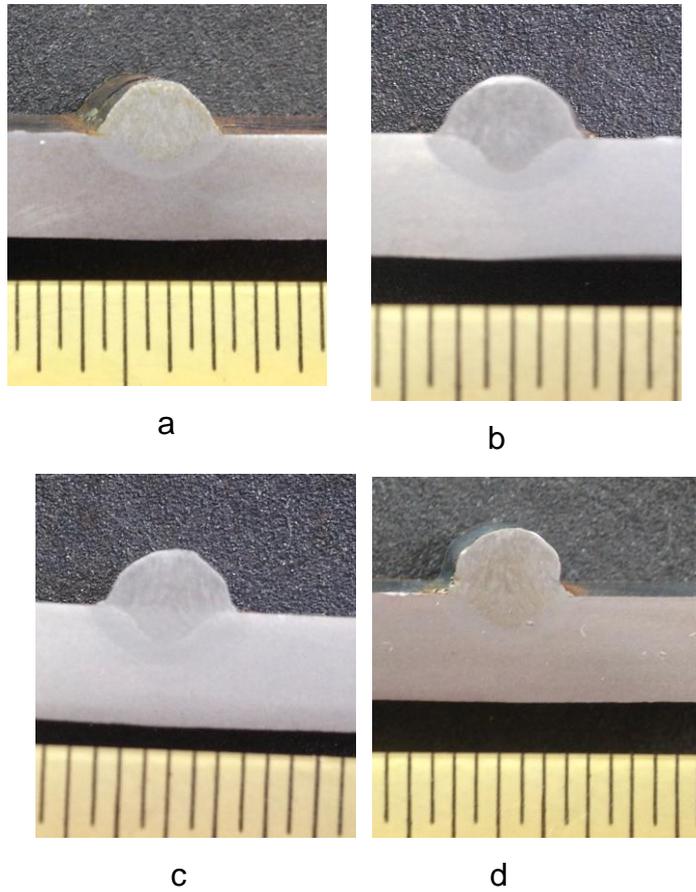


Figura 37: Macrografia dos cordões de solda.

- a) Ar+12%CO₂-V_{alim} 4 m/min, b) Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆-V_{alim} 4 m/min,
c) Ar+12%CO₂-V_{alim} 5 m/min, d) Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆-V_{alim} 5 m/min

Na tabela 31 pode ser observada as dimensões dos cordões de solda: largura (L), reforço (R) e penetração (P).

Tabela 31: Dimensões dos cordões de solda

Gás	V_{alim} (m/min)	CP	R (mm)	L (mm)	P (mm)
Ar+12%CO ₂	4	12C4-1	4,3	7,5	1,7
		12C4-2	3,4	7,1	1,8
		média	3,8	7,3	1,7
	5	12C5-1	3,2	6,6	2,1
		12C5-2	4,2	8,2	2,2
		média	3,7	7,4	2,1
Ar+12%CO ₂ + 0,4%C ₃ H ₆	4	25P4-1	3,3	6,8	2,0
		25P4-2	3,6	7,5	2,3
		média	3,4	7,1	2,1
	5	25P5-1	3,7	7,4	1,6
		25P5-2	3,8	7,4	2,2
		média	3,7	7,4	1,9

A figura 38 mostra a variação das médias das dimensões dos cordões de solda, comparando o desempenho do gás convencional com a adição do C₃H₆.

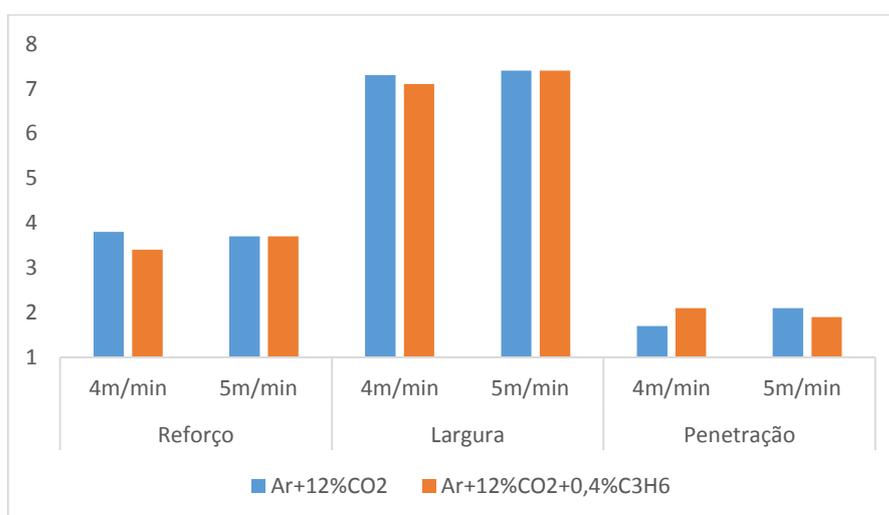


Figura 38: Média das dimensões dos cordões de solda

Nas soldas realizadas com V_{alim} de 4 m/min é possível perceber que a adição de C_3H_6 resultou em uma pequena diminuição dos valores de reforço e largura e um pequeno aumento na penetração.

De modo geral as soldas realizadas na V_{alim} de 5 m/min apresentaram um aumento nos valores das dimensões quando comparadas com as soldas realizadas na V_{alim} de 4 m/min, no gás convencional e com adição de C_3H_6 .

A adição de C_3H_6 na V_{alim} de 5 m/min apresentou valores de reforço e largura semelhantes em comparação com o gás convencional, e uma pequena diminuição no valor de penetração.

Os valores de penetração encontrados não estão de acordo com a literatura ou a trabalhos relacionados conforme Ribeiro (2016) e Ferreira (2018). Esperava-se obter uma maior penetração ao adicionar o C_3H_6 . Esse fato pode estar associado a pouca quantidade de cortes e medidas feitas no cordão de solda da amostra ou a alguma falha experimental.

4.2.6 Considerações finais da Etapa 2

De modo geral, a adição C_3H_6 não afetou de forma significativa o processo de soldagem. Mantendo os cordões de solda com boa aparência sem descontinuidades superficiais.

A adição de C_3H_6 ao $Ar+12\%CO_2$ resultou em maior estabilidade no processo, com redução nos valores dos índices de estabilidade na V_{alim} de 4 m/min e pouca variação na V_{alim} de 5 m/min. Houve uma redução na taxa de respingos e de escória e um aumento da taxa de deposição, o que mostra uma maior estabilidade e eficiência do processo de soldagem. Foi possível realizar soldas de qualidade em ambas V_{alim} utilizando valores próximos de corrente e tensão.

A adição de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$ gerou uma ligeira perda na estabilidade do processo, com um aumento dos valores dos índices de estabilidade nas duas V_{alim} , resultando em maior taxa de respingos e de escória e uma pequena diminuição da taxa de deposição.

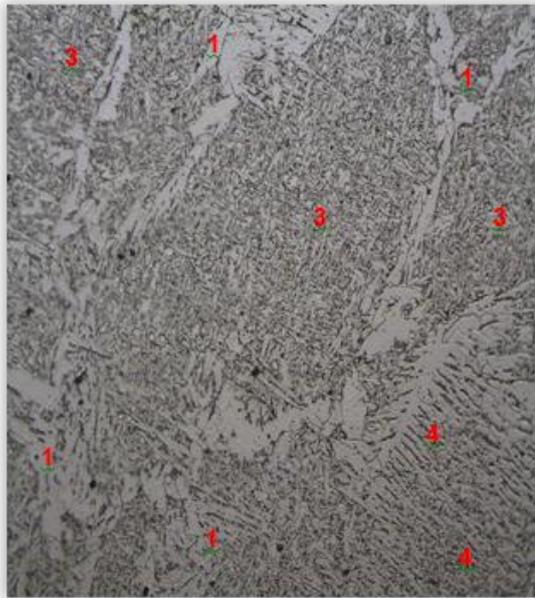
4.3 Etapa 3

Foram avaliadas a microestrutura e dureza dos cordões de solda. Para isso, uma amostra de cada mistura de gás em cada V_{alim} foi preparada conforme descrito na metodologia.

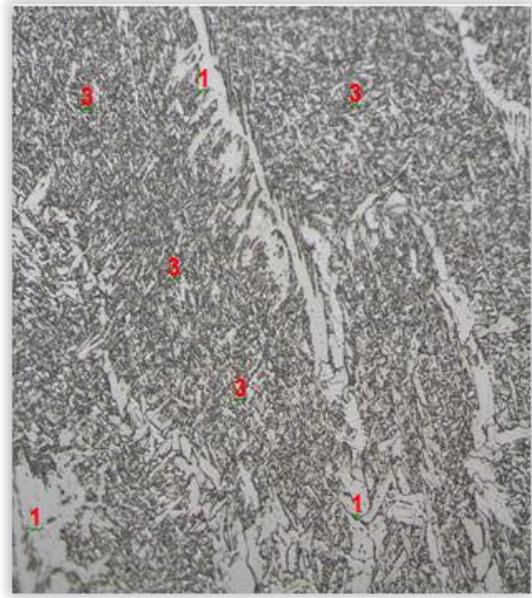
4.3.1 Análise da microestrutura do metal de solda

- Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆

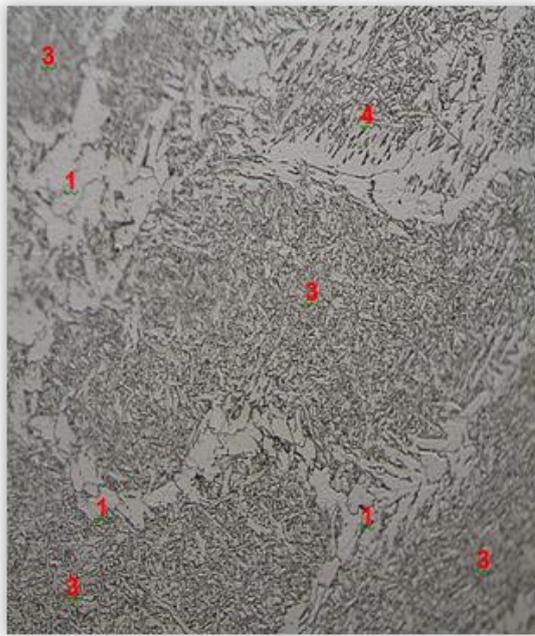
A figura 39 a, b, c, d mostra as micrografias da zona fundida (ZF) do metal de solda com aumento de 500x relativo aos gases de proteção Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ nas V_{alim} de 4 e 5 m/min.



a



b



c



d

Figura 39: Micrografia metal de solda. Aumento 500x.

Identificação : 1- FS(NA), 2-PF(G), 3-AF, 4-FS(A)

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

c) Ar+25%CO₂-V_{alim} 5m/min, d) Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆-V_{alim} 5m/min.

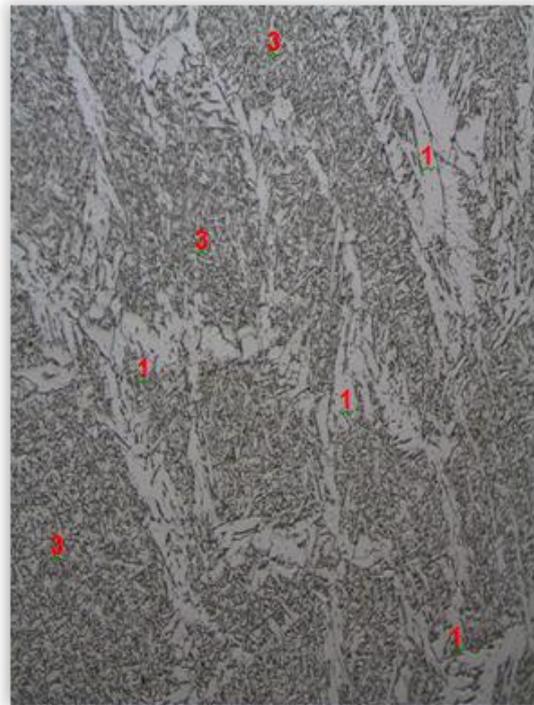
A ZF das soldas realizadas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆ apresentaram microestruturas com predominância de ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)) e com segunda fase não alinhada (FS(NA)). A ZF não apresentou as fases martensita (M) e agregados ferrita-carbetos (FC). Pode-se observar que as microestruturas encontradas são típicas do metal de solda de aços ferríticos (Almeida et al., 2009; Silva et al., 2001).

De modo geral, a adição de C₃H₆ ao Ar+25%CO₂ não causou alterações na microestrutura da ZF do metal de solda.

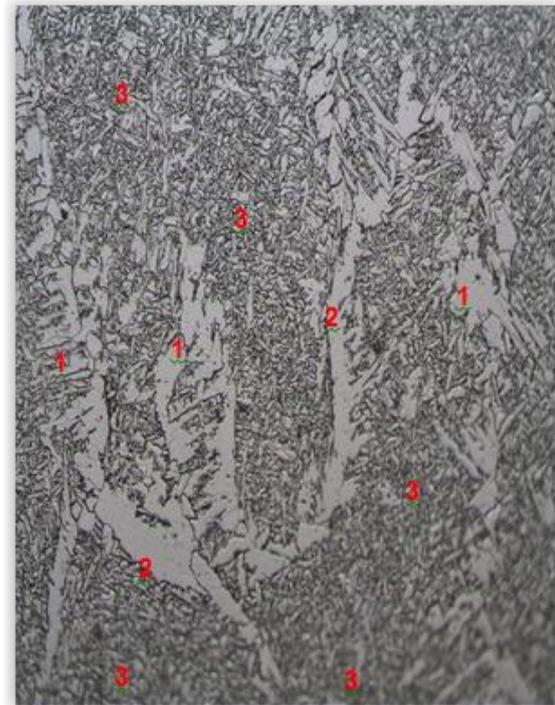
As morfologias identificadas foram semelhantes as observadas por Ribeiro (2016), Polonine (2018) e Costa (2019) que também trabalharam com essas misturas gasosas.

- Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

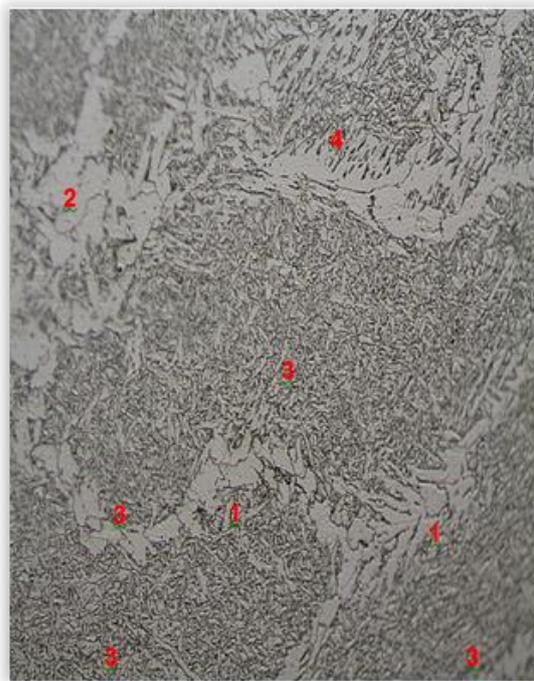
A figura 40 a, b, c, d mostra as micrografias da zona fundida (ZF) do metal de solda com aumento de 500x dos gases de proteção Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ nas V_{alim} de 4 e 5 m/min.



a



b



c



d

Figura 40: Micrografia metal de solda. Aumento 500x.

Identificação : 1- FS(NA), 2-PF(G), 3-AF, 4-FS(A)

- a) Ar+12%CO₂-V_{alim} 4 m/min, b) Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆-V_{alim} 4 m/min,
c) Ar+12%CO₂-V_{alim} 5 m/min, d) Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆-V_{alim} 5 m/min

A ZF das soldas realizadas com Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ apresentaram microestruturas similares com as soldas realizadas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+0,6%C₃H₆, com predominância de ferrita acicular (AF), ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)) e com segunda fase não alinhada (FS(NA)). A ZF não apresentou as fases martensita (M) e agregados ferrita-carbetos (FC).

Nota-se que a adição de C₃H₆ ao Ar+12%CO₂ também não causou alterações na microestrutura da ZF do metal de solda.

As morfologias identificadas foram semelhantes as observadas por Ribeiro (2016) e Ferreira (2018) que trabalharam com gases convencionais e com adição de propileno.

4.3.2 Dureza Vickers

A tabela 32 apresenta os valores da dureza Vickers (HV) medidos no metal de base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF) para os gases de proteção utilizados na V_{alim} de 4 m/min.

Tabela 32: Valores de dureza medidos na V_{alim} de 4 m/min

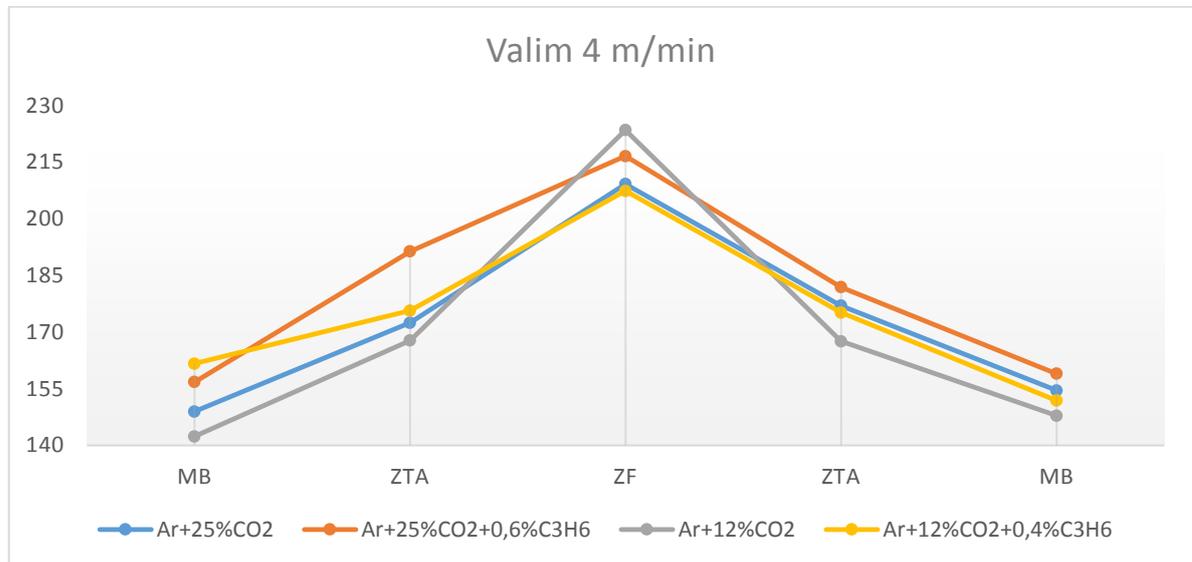
Região	Ar+	Ar+	Ar+	Ar+
	25%CO ₂	25%CO ₂ +0,6% C ₃ H ₆	12%CO ₂	12%CO ₂ +0,4% C ₃ H ₆
MB	144,9	151,2	136,5	145,8
	151,4	155,4	148,5	176,1
	150,7	163,9	142,3	163,1
média	149,0	156,8	142,4	161,7
ZTA	170,3	183,6	159,9	164,3
	172,5	188,3	167,2	170,5
	174,6	202,3	176,3	192,4
média	172,5	191,4	167,8	175,7
ZF	200,7	218,8	226,4	207,7
	207,4	225,5	221,8	196,6
	200,2	220,6	231,2	210,2
	215,0	211,6	217,6	208,8
	223,7	206,6	220,0	212,4
	208,5	216,8	224,3	208,5
média	209,2	216,6	223,5	207,4
ZTA	195,1	196,6	168,8	181,8
	170,5	179,2	175,6	175,7
	165,5	170,1	158,5	168,2
média	177,0	181,9	167,6	175,2
MB	151,1	176,1	144,5	155,2
	151,7	151,1	146,7	151,7
	161,1	150,0	152,6	148,9
média	154,6	159,0	147,9	151,9

A tabela 33 apresenta os valores da dureza Vickers (HV) medidos no MB, ZTA e ZF para os gases de proteção utilizados na V_{alim} de 5 m/min.

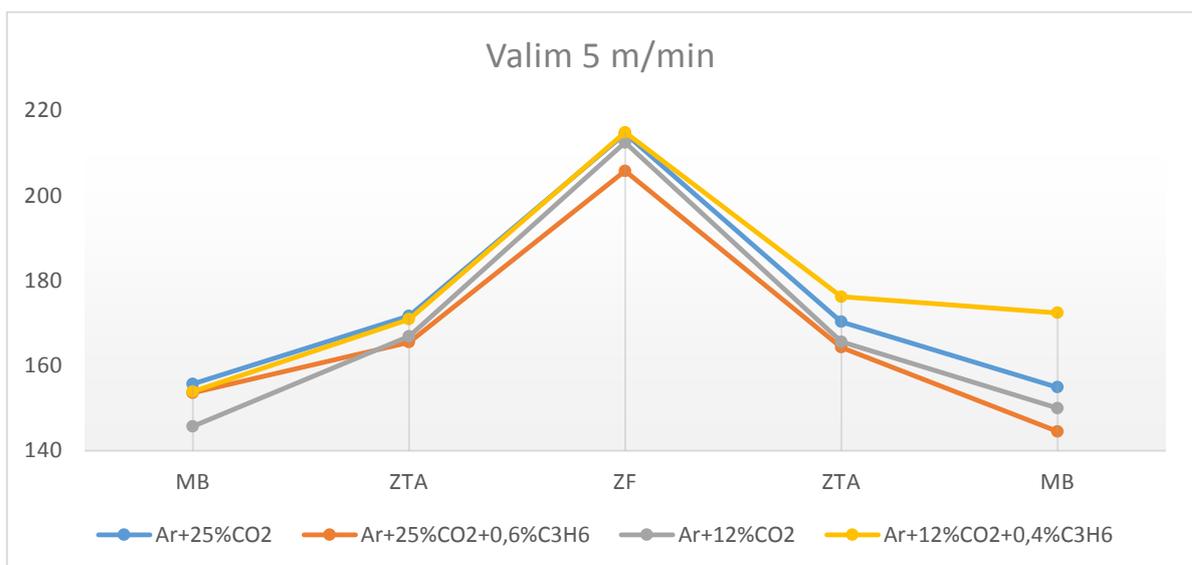
Tabela 33: Valores de dureza medidos na V_{alim} de 5 m/min

Região	Ar+	Ar+	Ar+	Ar+
	25%CO ₂	25%CO ₂ +0,6% C ₃ H ₆	12%CO ₂	12%CO ₂ +0,4% C ₃ H ₆
MB	154,2	149,9	138,8	151,1
	152,9	151,7	140,6	151,7
	159,9	159,2	157,7	159,0
média	155,7	153,6	145,7	153,9
ZTA	161,8	168,2	154,5	158,1
	179,8	162,8	162,4	173,8
	173,4	165,5	183,9	180,9
média	171,7	165,5	166,9	170,9
ZF	223,4	208,5	221,5	212,2
	214,4	200,0	211,6	214,2
	224,6	212,7	208,8	221,2
	209,3	208,0	215,0	223,4
	206,6	202,3	210,2	213,9
	209,1	203,1	207,7	205,0
média	214,6	205,8	212,5	214,9
ZTA	183,4	172,5	172,3	183,9
	167,1	166,8	169,0	177,4
	160,5	153,6	155,4	167,2
média	170,3	164,3	165,6	176,2
MB	154,5	141,2	142,9	208,8
	153,5	148,5	153,8	161,4
	156,7	143,7	153,5	146,9
média	154,9	144,5	150,0	172,4

A figura 41 mostra a curva de dureza, baseado nos valores médios obtidos dos gases de proteção nas V_{alim} de 4 e 5 m/min.



a



b

Figura 41: Curva de dureza dos gases de proteção:
a) V_{alim} de 4 m/min, b) V_{alim} de 5 m/min.

Os valores médios de dureza do MB variam de 145,1 a 163,1 HV e na ZTA variam de 164,9 a 186,6 HV para os quatro gases de proteção. Observa-se que a ZTA mais próxima da ZF apresenta valores maiores de dureza, provavelmente associado as diferentes morfologias que compõe essa região.

Segundo Kou (1987), durante o processo de soldagem, que dá origem ao cordão de solda, surge um gradiente térmico no metal de base, criando uma região denominada zona termicamente afetada (ZTA), que representa a região da solda que não se fundiu durante a soldagem, porém devido as altas temperaturas atingidas no processo, sofre modificações em suas propriedades mecânicas e metalúrgicas. Essas modificações resultam em diferenças no valor da dureza, tamanho do grão e resistência mecânica, presentes nesta região (Barbosa, 2007).

A ZF apresentou os maiores valores médios de dureza variando de 205,8 a 223,5 HV. Esses valores mais elevados são atribuídos a predominância de ferrita acicular. Este comportamento, foi apresentado por esta região para os quatro gases utilizados e está de acordo com a análise microestrutural, onde não foram percebidas diferenças significativas entre os gases utilizados.

Os resultados obtidos mostram que a adição de C_3H_6 não resultou em alteração significativa nos valores de dureza, concordando com os resultados de Ribeiro (2016), Ferreira (2018), Polonine (2018) e Costa (2019).

4.3.3 Considerações finais da Etapa 3

As microestruturas dos metais de solda mostraram a presença em maior quantidade de quatro fases: ferrita acicular, ferrita de contorno de grão, ferrita com segunda fase alinhada e com segunda fase não alinhada.

A microestrutura observada associada com os resultados de dureza Vickers indicam que não houve a formação de fases frágeis e duras como a martensita no metal de solda depositado nas atmosferas com e sem adições de propileno.

A adição de propileno não promoveu alterações na microestrutura do metal de solda e nos valores de dureza apresentados.

5. CONCLUSÕES

O estudo do efeito das adições de 0,6% de C_3H_6 a mistura de $Ar+25\%CO_2$ e 0,4% de C_3H_6 a mistura de $Ar+12\%CO_2$, na soldagem de aço carbono utilizando o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito, permite concluir que:

- Foi possível determinar uma faixa operacional em que a estabilidade do processo foi considerada adequada para os quatro gases de proteção utilizados;
- Para obter uma adequada estabilidade foi necessário um aumento na tensão ao soldar com o $Ar+25\%CO_2+0,6\%C_3H_6$ e uma redução na tensão ao soldar com $Ar+12\%CO_2+0,4\%C_3H_6$;
- A adição de C_3H_6 nos gases convencionais não produziu alterações significativas no aspecto superficial e interno dos cordões de solda, isentos de descontinuidades. Também não causou alterações nas microestruturas e nos valores de dureza;
- A adição de C_3H_6 na V_{alim} de 4 m/min proporcionou uma melhora do comportamento operacional do processo para o $Ar+12\%CO_2$ e uma piora para o $Ar+25\%CO_2$. Na V_{alim} de 5 m/min a adição de C_3H_6 não causou alterações significativas da estabilidade do processo para o $Ar+12\%CO_2$ e não foi vantajosa para o $Ar+25\%CO_2$;
- A adição de 0,4% de C_3H_6 foi positiva para o $Ar+12\%CO_2$ proporcionando uma maior estabilidade no processo, reduzindo a quantidade de respingos e escória gerados, causando um pequeno aumento da taxa de deposição;
- A adição de 0,6% de C_3H_6 ao $Ar+25\%CO_2$ não foi significativa na estabilidade do processo, gerando um aumento na taxa de respingo e escória e redução na taxa de deposição;
- Por fim, pode-se concluir que a adição de C_3H_6 foi benéfica para a estabilidade do processo do $Ar+12\%CO_2$, e não apresentou vantagens para o $Ar+25\%CO_2$.

6. SUGESTÕES

A partir das análises desse trabalho é possível sugerir alguns estudos, que são:

- Aumentar a concentração de C_3H_6 no $Ar+12\%CO_2$, visando avaliar a quantidade de respingos e escória que irá gerar;
- Realizar a coleta de respingos e escória gerados durante a soldagem considerando cada parâmetro de soldagem e não apenas a mistura gasosa;
- Estudar o efeito da adição de outros gases combustíveis aos gases de proteção convencionais;
- Investigar os aspectos econômicos envolvidos na soldagem em atmosferas de proteção com adição C_3H_6 .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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) *Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico*. Disponível em: https://industrial.airliquide.com.br/sites/industry_br/files/sds/2016/05/30/23.055_-_mistura_c3h6_propileno_em_ar.pdf em 22/03/2017

Almeida, L. L. P.; Tatagiba, L. C. S.; Rocha, J. P.; Paranhos, R. P. R. (2009). *Avaliação da junta soldada com suporte cerâmico a base do mineral refratário cordierita*; In: 5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte - MG, 7p.

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.

Arroio, A., Honório, K. M., da Silva, A. B. (2010). Propriedades químico-quânticas empregadas em estudos das relações estrutura-atividade. *Química Nova*, v. 33, n. 3, p. 694-699.

AWS (1991). *Elding Handbook: Welding Processes*. American Welding Society, v.2 8 Ed. Miami, FL. 955 p.

AWS (2004). *Welding Handbook: Welding Processes, Part 1*. American Welding Society, v. 2, 9. ed. Miami, FL.

AWS (2011). A5.32M/A5.32. *Welding Consumables - Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes*. 2. ed. American Welding Society.

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>

Barbosa, R. P. (2007) *Tecnologia Mecânica – Metalurgia da soldagem, soldabilidade dos materiais*. UNILESTE, Coronel Fabriciano-MG.

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

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

Brito, J. D.; Paranhos, R. (2205). Como determinar os custos da soldagem. Campos dos Goytacazes-RJ. 74p.

Costa, G. M. (2019). Estudo da adição de propileno aos gases de proteção convencionais na soldagem GMAW aplicada a juntas de topo e ângulo. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Costa, M. C. M. S., Starling, C. M. D., Modenesi, P. J. (2009). Low oxidation potential shielding gas instability in GMA welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 14, n. 1, p. 42-51.

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. (1989). Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 178 p.

Dutra, J. C. (2008). MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. *Soldagem & Inspeção*, v. 13, n. 1, p. 19-24.

Dutra, J. C., Baixo, C. E. I. (1995). Influência da Taxa de Variação da Corrente na Regularidade em Soldagem Mig/Mag por Curto Circuito. XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem - ENTS, Caxias do Sul - RS. XXI ENTS. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, p. 903-920.

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.

FBTS. (2004) Processos de Soldagem: Soldagem MIG/MAG. Disponível em http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1_D4_T4_MIG%20MAG.pdf.

Ferraresi, V. A., Figueiredo, K. M., Ong, T. H. (2003). Metal Transfer in the Aluminum Gas Metal Arc Welding. *Journal of the Brazil Society on Mechanical Science and Engineering*, v. 25, n. 3, p. 229-234.

Ferreira, A. C. M. (2018). Estudo de soldas obtidas pelo processo GMAW empregando o modo de transferência metálica por spray com misturas de proteção Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

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.

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

Gentil, V. (1996). Corrosão. Livros Técnicos e Científicos. Editora - LTC. 3 ed. Rio de Janeiro.

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.

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. *Soldagem & Inspeção*, v.2, n.1, p. 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>

IMC Soldagem (2014). SAP-V4 + V4Ti + V4CTi – Manual do Sistema. 4 ed. Palhoça-SC.

ISO 6507-1 (2018). Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method.

Jones L. A., Eagar, T. W., Lang, J. H. (1998). Images of Steel Electrode in Ar-2%O₂ Shielding during Constant Current Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*, 77(4), p. 135s-141s

Jonsson, P. G., Murphy, A. B., Szekely, J. (1995). The influence of oxygen additions on argon-shielded gas metal arc welding processes. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, v. 74, n. 2, p. 48s-58s.

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., Rhee, S. (2001). A Study on the Development of the Arc Stability Index Using Multiple Regression Analysis in the Short-Circuit Transfer Region of Gas Metal Arc Welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 215, n. 2, p. 195-205.

Kim, Y-s, e Eagar, T. W. (1993). Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Research*, 269–278.

Kou, S. *Welding Metallurgy*. New York: John Wiley & Sons, 1987.

Lancaster, J.F. (1996). *The Physics of Welding*. Oxford: Pergamon Press. London. 2 Ed. 340 p..

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

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

Liskevych, O., Scotti, A. (2015). Influence of the CO₂ content on operational performance of short-circuit GMAW. *Welding in the World*, v. 59, n. 2, p. 217-224.

Machado, I.G. (1996). *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Editado pelo autor, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 477 p.

Marques, P. V. (1991). *Tecnologia da Soldagem*. Belo Horizonte. ESAB. 352 p.

Marques, P.V.; Modenesi, P.J; Bracarense, A.Q. Soldagem (2009). Fundamentos e Tecnologia. 3ed. Belo Horizonte, editor UFMG.

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

Marques, P.V.; Modenesi, P.J. Introdução aos Processos de Soldagem. Ed. UFMG, Belo Horizonte, 51p., 2000.

Modenesi, P. J., & De Avelar, R. C. (1999). The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 86, n. 1, p. 226-232.

Modenesi, P.J., Nixon, J.H. (1994). Arc instability Phenomena in GMAW Welding. *Welding Journal Including Welding Research Supplement*, v. 73, n. 9, p. 219-224.

Modenesi, P.; Marques, P. V. (2000). Introdução aos processos de soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

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

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

Modenesi, P.J. (2012) *Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. Belo Horizonte - MG, Publicação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

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, 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.

Morganti, M. P. S. (2013) *Estudo da influência do espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo robotizado de soldagem MIG/MAG de junta sobreposta para arame de 1,2mm*. Especialização em Engenharia de Soldagem – São Caetano do Sul – SP, Escola de Engenharia Mauá, 51p.

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))

Norrish, J. (1992). *Advanced Welding Processes*. (J. W. Nottingham e D. A. Worcester, Eds.) (pp. 1–373). London: IOP Publishing Ltd.

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

Ogino, Y.; Hirata, Y. (2015). Numerical Simulation of Metal Transfer in Argon Gas-Shielded GMAW. *Welding in the World*, 59, 465-473

Pires, I., Rosado, T., Costa, A., Quintino, L. (2007). Influence of GMAW shielding gas in productivity and gaseous emissions. In: 10th International Aachen Welding Conference. Aachen, Germany.

Pires, I., Quintino, L., Miranda, R.M. (2007). Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. *Materials and Design* 28. 1623-1631

Planckaert, J.P., Djermoune, E.H., Brie, D., Briand, F., Richard, F. (2010) Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies. *Applied Mathematical* 34: 1004-1020.

Polonine, A. F. (2018). Estudo do efeito do gás propileno no processo GMAW utilizando a transferência metálica por curto – circuito. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Ponomarev, V. et al. (2004). Optimisation of MAG-CO₂ welding short-circuiting metal transfer, *International Journal for the Joining of Materials*, Denmark, v.16, n.2, p.43-48, jun.

Ponomarev, V. et al. (2004). Investigation of the mechanism of short arc MIG/MAG welding metal transfer mixed modes, *International J. for the Joining of Materials*, 16(3), Sept. 2004, p. 65-70.

Ramalho, J. (2008) *Física dos processos de soldagem e corte chama para soldagem e corte*. Curso de especialização em Engenharia de Soldagem. 12p.

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>.

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

Resende, A., Keocheguerians, F., Vilarinho, L. O. (2009). Influência dos Teores de CO₂ e O₂ na Corrente de Transição Globular-Goticular Utilizando Misturas a Base de Argônio Durante a Soldagem GMAW de Arame ER70S-6. *Soldagem & Inspecao*, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 26-35

Rezende, G. M. C., Liskévych, O., Vilarinho, L. O., & Scotti, A. (2011). Um critério para determinar a regulação da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. *Soldagem e Inspeção*, 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, S. A., Fals, H. C., Fernández, J. B., Adán, F. S. (2005). Application of U versus I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Transfer Mode. *Soldagem & Inspeção*, v. 10, n. 2, p. 85-91.

Santos, F. G. dos. (2018). Estudo do efeito da adição de hidrogênio nos gases de proteção convencionais na soldagem GMAW em juntas de topo e ângulo. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

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

Scotti, A., Ponomarev, V. (2014). *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 288p.

Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W. (2012). A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, v. 6, p. 1406-1413.

Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W. (2014). Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 11, p. 2488-2496.

Scotti, A.; Resende, A. A.; Souza, D. Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influencia da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG. *Soldagem e Inspeção*. São Paulo, Vol. 14, No. 3, p.192-198, Jul/Set 2009.

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 utilizado na construção civil. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 3–4.

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

Silva, R. H. G. (2005). Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito controlado aplicada ao passe de raiz. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Florianópolis – SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC , 113p.

Silva, R.H.G., Dutra, J.C., Gohr, R.Jr (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 Mecanismos de Fusão do Arame. *Soldagem & Inspeção*. v. 12, n. 3, p. 237-243.

Silva, R.H.G., Dutra, J.C., Gohr, R.Jr (2008). Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) - Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. *Revista Soldagem e Inspeção*. 13(1): 70- 81.

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

Souza, D.; Resende, A. A.; Scotti, A. (2009). Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG. *Soldagem e Inspeção (Impresso)*, v. 14, p. 192-198.

Souza, D., Rossi, M. L., Keochequerians, F., Nascimento, V. C., Vilarinho, L. O., Scotti, A., (2011). Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade

do Processo MIG-MAG Operando em Curto-Circuito. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 22-32.

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

Suban, M., Tušek, J. (2001). Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 119, n. 1, p. 185-192.

Tatagiba, L. C. S., Gonçalves, R. B., Paranhos, R., (2012). Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG-MAG. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 17, n.3, p. 218-228.

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

Tušek, 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*, v. 25, n. 4, p. 369-376.

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

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

Villani, P.; Modenesi, P.; Bracarense, A. Q. (2006). Fundamentos da soldagem. Belo Horizonte: Editora UFMG, 362 p.

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

White Martins. (2010) White Martins Praxair INC: Gases Especiais e Equipamentos. Disponível em: <<http://www.praxair.com.br/gases/specialty-gases>>. Acesso em 04/05/2017.