

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

ANA CAROLINA MAIA FERREIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
MARÇO 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

37/2018

Ferreira, Ana Carolina Maia

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 / Ana Carolina Maia Ferreira. – Campos dos Goytacazes, 2018.

ix, 99 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2018.

Orientador: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos.

Área de concentração: Metalurgia física.

Bibliografia: f. 83-89.

1. MODO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR SPRAY 2. CORRENTE DE TRANSIÇÃO 3. ESTABILIDADE 4. SOLDAGEM GMAW 5. PROPILENO
I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título

CDD 669.9

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

ANA CAROLINA MAIA FERREIRA

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
MARÇO 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

ANA CAROLINA MAIA FERREIRA

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.

Aprovada em 16 de março de 2018.

Comissão Examinadora:

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

Prof^a, Elaine Cristina Pereira (DSc. Engenharia e Ciência dos Materiais) - UENF

Prof^a, Cátia Cristina Brito Viana (DSc. Engenharia e Ciência dos Materiais) - IFF

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar mais essa vitória e me dar forças para conseguir alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, minha irmã e família por acreditarem no meu potencial e incentivarem os meus estudos.

Aos amigos que a UENF me deu a oportunidade de conhecer e que fizeram desses dias os mais divertidos, Carol, Ana, Anderson, Guilherme, Felipe, Marcelo, Rafael, entre outros mais.

Ao professor Paranhos pela orientação e paciência.

As minhas amigas de república que foram mais que amigas e sim família, Luana, Thaís e Samilla.

A equipe da FAETEC pela paciência e receptividade nos períodos de experimento.

A professora Angélica pela ajuda e disposição.

Ao técnico Sílvio pela boa vontade e competência.

Aos professores do LAMAV que nos oferecem conhecimento e sabedoria.

E a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para que eu alcançasse mais essa etapa. Muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA	VIII
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 JUSTIFICATIVA	3
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 SOLDAGEM GMAW	5
2.1.1 O Arco Voltáico	7
2.1.2 A Coluna de Plasma	9
2.1.3 Variáveis do Processo	10
2.1.3.1 Tensão de Soldagem	11
2.1.3.2 Corrente de Soldagem.....	11
2.1.3.3 Velocidade de Soldagem.....	12
2.1.3.4 Extensão Livre do Eletrodo.....	13
2.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA	15
2.2.1 Forças atuantes na transferência metálica	16
2.2.1.1 Força gravitacional (F_g)	17
2.2.1.2 Força devido à tensão superficial (F_γ)	18
2.2.1.3 Força eletromagnética (f_{em})	19
2.2.1.4 Força de arraste (F_a)	22
2.2.1.5 Força de vaporização (F_v)	22
2.2.2 Transferência por Curto Circuito	24

2.2.3 Transferência Globular	26
2.2.4 Transferência por Spray	27
2.2.4.1 Relação entre parâmetros de soldagem e gases de proteção na Transferência por Spray	32
2.2.4.2 Teoria da instabilidade de <i>Pinch</i>	37
2.2.4.3 Determinação da corrente de transição.....	38
2.2.5 Estabilidade do Processo	39
2.3 GASES DE PROTEÇÃO.....	40
2.3.1 Propriedades dos Gases	41
2.3.1.1 Potencial de Ionização.....	41
2.3.1.2 Densidade	42
2.3.1.3 Condutividade Térmica.....	42
2.3.1.4 Potencial de Oxidação.....	44
2.3.2 Propileno.....	45
2.3.3 Fatores Econômicos	46
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 MATERIAIS.....	48
3.2 EQUIPAMENTOS	49
3.3 METODOLOGIA	50
3.3.1 Ajustes Iniciais	50
3.3.2 Etapa I: Análise da Transição Globular-Spray	52
3.3.2.1 Soldagem das chapas	52
3.3.2.2 Avaliação da Etapa I.....	52
3.3.3 Etapa II: Análise da estabilidade da transferência por spray e avaliação do cordão de solda	53
3.3.3.1 Soldagem das chapas	53
3.3.3.2 Inspeção Visual e Líquido Penetrante	54

3.3.4 Etapa III: Análise do metal de solda.....	54
3.3.4.1 Avaliação geométrica da zona fundida, Índice de convexidade (IC) e taxa de deposição.	54
3.3.4.2 Análise Microestrutural	55
3.3.4.3 Dureza Vickers	56
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.2 Etapa I: Análise da Transição Globular-Spray	58
4.2.1 Soldagem das chapas	58
4.3 Etapa II: Análise da estabilidade da transferência por spray e avaliação do cordão de solda	64
4.3.1 Soldagem das chapas	64
4.3.2 Inspeção Visual e Líquido Penetrante	65
4.4 Etapa III: Análise do metal de solda.....	72
4.4.1 Avaliação geométrica, Índice de convexidade e penetração	73
4.4.2 Análise Microestrutural	75
4.4.3 Dureza Vickers.....	77
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	80
CAPÍTULO 6: SUGESTÕES.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE I.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo básico de soldagem GMAW (Fortes, 2005).....	5
Figura 2: Itens de um sistema de soldagem semiautomática para aplicação GMAW (adaptado ESAB, 2014)	6
Figura 3: Regiões do arco elétrico (Scotti e Ponomarev, 2014)	8
Figura 4: Emissão catódica (adaptado Modenesi e Bracarense, 2007)	9
Figura 5: Esquema para o balanço de energia no ambiente da coluna de plasma de um arco (Modenesi <i>et al.</i> , 2012).....	9
Figura 6: Relação entre a taxa de deposição e a corrente de soldagem para arames do grupo T-1 (Joaquim, 2001).....	12
Figura 7: Representação esquemática da extensão do eletrodo	13
Figura 8: Efeito da distância entre o bico de contato e a peça na corrente de soldagem (adaptado de ESAB, 2005).....	13
Figura 9: Diferentes distâncias entre a extremidade do bico de contato e a peça (Morganti, 2013).....	14
Figura 10: Efeito da distância bico de contato peça na corrente e na taxa de deposição (Höhn, 2010).....	14
Figura 11: Esquema das condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para GMAW com um gás de proteção a base de argônio	16
Figura 12: Forças governantes da transferência metálica no processo GMAW.....	17
Figura 13: Ilustração da força gravitacional e sua atuação no destacamento da gota de acordo com a posição da soldagem.....	18
Figura 14: Crescimento competitivo entre as forças da gravidade e, devido à tensão superficial, mostrando o diâmetro crítico em que a gota se destaca.....	19
Figura 15: Geração das forças eletromagnéticas (radiais) na gota do metal líquido de forma cilíndrica (Scotti e Ponomarev, 2014).....	21
Figura 16: Ilustração do efeito da f_{em} no processo de empescoçamento (adaptado de Slania, 1996)	21
Figura 17: Linhas de fluxo do gás de proteção através da gota de metal	22
Figura 18: Esquemática do desvio da gota devido a arco com conexão concentrada e fora da linha de centro (Scotti e Ponomarev, 2014).....	23
Figura 19: Transferência por curto-circuito (Modenesi <i>et al.</i> , 2012)	25
Figura 20: Esquema de desprendimento da gota no arame	26

Figura 21: Oscilogramas de corrente de um processo com transferência globular em 250ms (Modenesi <i>et al.</i> , 2012)	27
Figura 22: Esquema de desprendimento da gota no arame	27
Figura 23: Volume e número de gotas transferidas por unidade de tempo com a corrente de soldagem (Marques, 1991)	28
Figura 24: Oscilograma de um processo com transferência spray (Modenesi <i>et al.</i> , 2012)	29
Figura 25: a) Spray Projetado; b) Spray com Alongamento; c) Spray Rotacional (Modenesi <i>et al.</i> , 2012).....	30
Figura 26: Transferência por spray no modo projetado (Souza, 2010)	31
Figura 27: Gotas durante a transferência no modo spray com alongamento	31
Figura 28: Gotas durante a transferência no modo spray com rotação.....	32
Figura 29: Ilustração do fenômeno de instabilidade da coluna de metal líquido conforme a Teoria da Instabilidade Pinch (Scotti e Ponomarev, 2014).....	38
Figura 30: Oscilogramas utilizando o método de perfilografia para determinação da corrente de transição utilizando como gás de proteção Ar + 15%CO ₂	38
Figura 31: Oscilogramas de transferências globular, spray e spray com alongamento ou streaming. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O ₂ (Jonson <i>et al.</i> , 1991)	40
Figura 32: Aspectos das gotas e o padrão de penetração para diferentes gases de proteção (Lincoln Electric Company, 2015).....	43
Figura 33: Os efeitos da adição de oxigênio e de CO ₂ ao argônio e o CO ₂ puro	43
Figura 34: Variação da condutividade térmica em função da temperatura	44
Figura 35: Molécula e energia de dissociação do propileno.....	45
Figura 36: Custo geral típico da solda no processo produtivo, para aço comum (Silva, 2005)	47
Figura 37: Sistema de aquisição de dados (IMC Soldagem, 2014).....	49
Figura 38: a) Cordão com baixa vazão de gás; b) cordão com baixa velocidade de soldagem.....	51
Figura 39: Parâmetros geométricos da solda (Silva e Scotti, 2002).....	55
Figura 40: Microconstituintes do metal de solda segundo o sistema IIW	56
Figura 41: Gráficos de tensão e corrente quando ocorre a transição para as duas velocidades de alimentação (6 e 7 m/min)	59

Figura 42: Gráficos de tensão e corrente quando ocorre a transição para 8 m/min de velocidade de alimentação	60
Figura 43: Média de correntes de transição versus velocidade de alimentação para as duas misturas trabalhadas.....	63
Figura 44: Chapa 1: Ar+12%CO ₂ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	65
Figura 45: Chapa 2: Ar+12%CO ₂ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	66
Figura 46: Chapa 3: Ar+12%CO ₂ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	66
Figura 47: Chapa 4: Ar+12%CO ₂ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	67
Figura 48: Chapa 5: Ar+12%CO ₂ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	67
Figura 49: Chapa 1: Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	68
Figura 50: Chapa 2: Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	68
Figura 51: Chapa 3: Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	69
Figura 52: Chapa 4: Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	69
Figura 53: Chapa 5: Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ . a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.	70
Figura 54: Desvio padrão de pico de corrente (DPPC) para as chapas soldadas com a mistura Ar+12%CO ₂ e com a mistura Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	71
Figura 55: Micrografias do metal de solda; Ar+12%CO ₂ - Legenda: 1- FS(A), 2- PF(G), 3-AF e 4-FS(NA). Aumento de 500X.	76
Figura 56: Micrografias do metal de solda; Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆ - Legenda: 1- FS(A), 2- PF(G), 3-AF e 4-FS(NA). Aumento de 500X.....	76
Figura 57: Taxa de deposição para o Ar+12%CO ₂ e Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW (adaptado Acesita, 2011)	15
Tabela 2: Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo GMAW (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2014)	24
Tabela 3: Faixas de corrente de transição típicas para diferentes materiais e diâmetros do eletrodo e gases de proteção (Scotti e Ponomarev, 2014)	33
Tabela 4: Parâmetros típicos de soldagem para aços	35
Tabela 5: Valores ajustados para o experimento	36
Tabela 6: Valores de correntes e tensão de transição médios monitorados durante o experimento (adaptado de Resende <i>et al.</i> , 2009)	36
Tabela 7: Propriedades dos gases de proteção mais utilizados.....	41
Tabela 8: Condutividade térmica dos gases utilizados em soldagem	42
Tabela 9: Quantidade e dimensões de chapas utilizadas em cada etapa.....	48
Tabela 10: Composição e nomenclatura dos gases.....	49
Tabela 11: Parâmetros fixos durante soldas	51
Tabela 12: Velocidade de alimentação, média da tensão de transição, média da corrente de transição e DPPC antes e após a transição para a mistura Ar+12%CO ₂	61
Tabela 13: Velocidade de alimentação, média da tensão de transição, média da corrente de transição e DPPC antes e após a transição para a mistura Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	62
Tabela 14: Valores médios de corrente calculadas no programa SAP para as chapas soldadas com Ar+12%CO ₂ e com Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	65
Tabela 15: Características geométricas: macrografias, largura (L), reforço (R), penetração (P) e índice de convexidade (IC).	74
Tabela 16: Durezas do metal de solda.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

A – Ampère
AF – Ferrita Acicular
Al – Alumínio
Ar – Argônio
Atm – Atmosférica
C – Carbono
C₃H₆ – Propileno
cm – Centímetro
CO₂ – Dióxido de carbono
CT – Condutividade térmica
D – Densidade
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
h – Hora
H₂ – Hidrogênio
He – Hélio
HV – Microdureza Vickers
I – Corrente

IC – Índice de convexidade
IIW – Instituto Internacional de Soldagem (do inglês Institute International Welding)
IMC – Engenharia de Soldagem Instrumentação e Automação LTDA
K – Kelvin
Kg – Quilograma
L – Largura
L – Litro
LP – Líquido penetrante
M – Martensita
m – metro
MAG – do inglês Metal Active Gás
MIG – do inglês Metal Inert Gás
min – minuto
mm – Milímetro
ms – Milisegundo
N₂ – Nitrogênio
O₂ – 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
SAE – Associação de Engenheiros Automotivos (do inglês Society of Automotive Engineers)
Td – Taxa de deposição
U – Tensão
UENF – Universidade Estadual Norte Fluminense
V – Volts
W – Watts

Resumo de dissertação de mestrado apresentada ao CCT/UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciências dos materiais.

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

ANA CAROLINA MAIA FERREIRA

16/03/2018

Orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

A pesquisa teve como objetivo fazer uma comparação entre as soldas realizadas com o processo GMAW, pelo modo de transferência metálica por spray, utilizando dois tipos de misturas de proteção: Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. Foi observado o momento da transição globular-*spray* e registrada a média de corrente quando ocorre essa transição para as duas misturas. Foi analisada a estabilidade da transferência em *spray* que constatou melhores resultados para Ar+12%CO₂. As soldas tiveram valores similares de penetração, largura e reforço para as duas misturas e o cálculo do índice de convexidade gerou resultados próximos de 30%, que resultam em soldas com boa geometria. Pela análise microestrutural e a medição de dureza Vickers, não foram observadas presença de fases duras e frágeis no metal de solda. Por fim, a taxa de deposição mostrou resultados semelhantes para as duas misturas, porém bem maiores aos comparados a outros trabalhos da literatura. A adição de 0,4% de propileno na mistura de proteção não causou mudanças significativas nas propriedades das soldas e reduziu a estabilidade da transferência por *spray* nas chapas realizadas com 31 V de tensão. Pode haver necessidade de maior porcentagem de propileno na mistura de proteção quando se utiliza a transferência por *spray* e também foi relatada a necessidade de maiores tensões nas soldas realizadas com esse gás para obter melhor estabilidade.

Palavras-chaves: Transferência em spray. Corrente de transição. Estabilidade. GMAW. Propileno.

Abstract of Dissertation presented to CCT/UENF as part of the requirements for obtaining the Master's Degree in Materials Engineering and Science.

STUDY OF WELDS OBTAINED BY THE GMAW PROCESS EMPLOYING METHOD OF METAL TRANSFER BY SPRAY WITH PROTECTION MIXES Ar+12%CO₂ and Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

ANA CAROLINA MAIA FERREIRA

16/03/2018

Orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

The aim of the research was to compare joints welded by GMAW, through metallic *spray* transfer process using two types of protection mixtures: Ar+12%CO₂ and Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. A mean value for the electric current was recorded at the globular-spray transition for both mixtures and an analysis of spray transfer stability was carried out, indicating a better performance for the Ar+12%CO₂ gas mix. Furthermore, similar values of penetration, width and reinforcement were observed for the two mixtures, and convexity index calculations yielded results close to 30%, which stands for good geometry welds. Microstructural and Vickers hardness analysis suggested that no hard or brittle phases were present in the weld metal. In addition, deposition rates were similar in both conditions, though much higher than those predicted in the literature. Finally, the addition of 0,4% of propylene in the protective mixture did not cause significant changes in the welds properties, but reduced the *spray* transfer stability in the plates welded with a voltage of 31 V. Higher percentages of propylene might be needed in the shielding mixture when using *spray* transfer processes and also higher welding voltages have been reported for better stability in the welds performed with this gas.

Keywords: Spray transfer. Transition current. Stability. GMAW. Propylene.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O processo GMAW (do inglês Gas Metal Arc Welding) tem ampla utilização nos diferentes ramos da indústria, por sua versatilidade, custo, produtividade, facilidade, entre outras vantagens. É um dos processos mais utilizados na junção de materiais através da soldagem. É empregado na fabricação, manutenção, recuperação de peças e equipamentos, e também em revestimentos de superfícies metálicas (Modenesi *et al.*, 2007).

GMAW se baseia na fonte de calor de um arco elétrico de alta energia, mantido entre a peça a ser soldada e o arame eletrodo que é alimentado continuamente e consumido durante o processo. A técnica pode ser mecanizada ou semiautomática. A proteção da solda é realizada por meio de gases inertes ou ativos ou por misturas de proteção. O uso desses gases é o que diferencia o processo que também pode ser chamado de MIG/MAG. O MIG (Metal Inert Gas) utiliza gases inertes como argônio e hélio, já o MAG (Metal Active Gas) emprega gases de proteção ativos como o CO₂. Tanto MIG quanto MAG podem utilizar misturas de gases para proteger a solda (Scotti e Ponomarev, 2014).

As vantagens em se utilizar o processo GMAW é sua elevada taxa de fusão do eletrodo, que significa uma alta taxa de deposição. Permite soldas em diversas posições e com menos quantidade de respingos. Os problemas encontrados na utilização desse processo estão relacionados às condições de estabilidade, pois a fonte de energia pode sofrer oscilações, tornando o processo instável. Os gases utilizados para proteção da poça de solda e a regulagem dos parâmetros de soldagem vão interferir nessa estabilidade. Essa estabilidade compreende a manutenção e funcionamento repetitivo do processo (Scotti e Ponomarev, 2014).

Existem poucos estudos sobre a adição de gases combustíveis nas atmosferas de proteção pelo processo GMAW, todavia esses gases apresentam um considerado potencial redutor característico dos produtos das suas reações. Esses gases também contribuem para que a temperatura no arco aumente devido à temperatura liberada durante a sua dissociação (Ribeiro, 2016).

O propileno (C₃H₆) é um gás combustível que durante sua dissociação fornece uma molécula de H₂ que funciona como redutor e um C que pode ser inserido no metal de solda. Na poça de solda, os íons resultantes das reações em alta

temperatura podem se recombinar/associar liberando energia sob a forma de calor (Modenesi *et al.*, 2007). A molécula de propileno possui uma dupla ligação, que na presença de O_2 , em um processo exotérmico semelhante à combustão, se quebra formando CO_2 e H_2O liberando alta energia na forma de calor para o arco elétrico (Ribeiro, 2016).

Ribeiro (2016) e Tatagiba (2015) avaliaram o efeito da adição de gases combustíveis em misturas convencionais de proteção em soldagem de aço carbono pelo processo GMAW utilizando transferência por curto-circuito. O trabalho de Ribeiro (2016) indicou que é possível a adição de C_3H_6 nas misturas $Ar+12\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2$. Essa adição proporcionou boa aparência dos cordões de solda e favoreceu a geometria do cordão. Além disso, as soldas com $Ar+12\%CO_2+0,4\%C_3H_6$ apresentam menores valores de DPPC que os encontrados nas soldas em $Ar+12\%CO_2$ indicando boa estabilidade da transferência. Tatagiba (2015) utilizou o gás hidrogênio e mostrou que a adição de $2\%H_2$ na mistura $Ar+25\%CO_2$ e a adição de $4\%H_2$ no CO_2 produziram soldas com igual, ou melhor estabilidade do que estes gases comerciais sem adição de H_2 .

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo nas soldas realizadas com as misturas de proteção $Ar+12\%CO_2$ e $Ar+12\%CO_2+0,4\%C_3H_6$ no processo GMAW, porém aplicando o modo de transferência em *spray*. Primeiramente foi observada a transição Globular-Spray e encontrado a média das correntes de transição. Também foi realizado um estudo a respeito da estabilidade da transferência metálica para as duas misturas de proteção utilizadas. Por fim, o metal de solda foi estudado por meio das macrografias, microestruturas, taxa de deposição e dureza Vickers.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho teve como objetivo geral fazer um estudo da soldagem GMAW aplicando mistura convencional de proteção ($Ar+12\%CO_2$) e mistura convencional de proteção acrescida de propileno ($Ar+12\%CO_2+0,4\%C_3H_6$), empregando o modo de transferência em *spray*.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar a transição *Globular-Spray* e determinar a média da corrente de transição para as misturas $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$;
- Analisar a estabilidade da transferência *spray* para as duas misturas trabalhadas por meio da avaliação do cordão de solda e pelo índice DPPC;
- Realizar um estudo da geometria do metal de solda por meio do índice de convexidade e penetração;
- Realizar a caracterização da microestrutura e medir a dureza Vickers do metal de solda;
- Calcular a taxa de deposição do processo para as duas misturas em estudo.

1.3 JUSTIFICATIVA

As indústrias buscam cada vez mais por processos de alta produtividade como é o caso do processo GMAW, devido às grandes demandas de mercado em relação aos diferentes tipos de aplicação e da qualidade das soldas obtidas. Por isso, esse processo tem atraído à atenção das pesquisas científicas que procuram por desenvolvimento de equipamentos e consumíveis mais eficientes, adequados e que proporcionem melhor qualidade e produtividade na soldagem.

Os gases mais comuns utilizados nas atmosferas de proteção no processo GMAW são o argônio (Ar), o dióxido de carbono (CO_2), o hélio (He) e misturas entre esses gases.

No trabalho de Ribeiro (2016) foi realizado um estudo do efeito da adição do gás propileno nas atmosferas de proteção convencionais do processo GMAW utilizando o modo de transferência por curto-circuito. O trabalho mostrou que a adição de 0,4% de C_3H_6 proporcionou soldas com bom aspecto visual, adequadas características geométricas e isentas de discontinuidades.

A adição do gás propileno pode contribuir para melhorar a estabilidade do processo como mostrado no trabalho de Ribeiro (2016) e aumentar a temperatura no arco elétrico contribuindo para maiores penetrações e altas taxas de deposição.

A proposta deste trabalho é avaliar como a adição do propileno na mistura de proteção vai se comportar quando na transferência por *spray* e não mais na transferência por curto-circuito. Explorar a influência da adição desse gás nas reações que utilizam altas temperaturas como é o caso do processo GMAW, e relacionar essa adição ao modo de transferência e às interações com o metal de solda será importante para a expansão do conhecimento sobre essa técnica.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM GMAW

Segundo Alves (2009) o processo GMAW consiste da abertura e manutenção de um arco elétrico entre o metal de base e o metal de adição. O metal de base é propriamente o metal a ser fundido que forma a poça de fusão e o metal de adição é o arame que é alimentado continuamente. É necessário que esse arame apresente uma proteção gasosa que irá viabilizar a proteção da gota metálica e da poça de fusão contra contaminantes presentes na atmosfera vizinha.

A fusão é localizada e a união da peça se dá pelo calor gerado no arco elétrico estabelecido entre o eletrodo e a peça de trabalho. Quando se inicia o processo, um curto-circuito entre o eletrodo e a peça produz a passagem de elevada corrente, provocando grande aquecimento. Com o aquecimento e a ruptura do curto circuito o arco se estabelece. A partir daí o arame forma gotas que são transferidas para a poça de fusão, formando o cordão de solda (Filho, 2012).

A Figura 1 apresenta um esquema do processo GMAW.

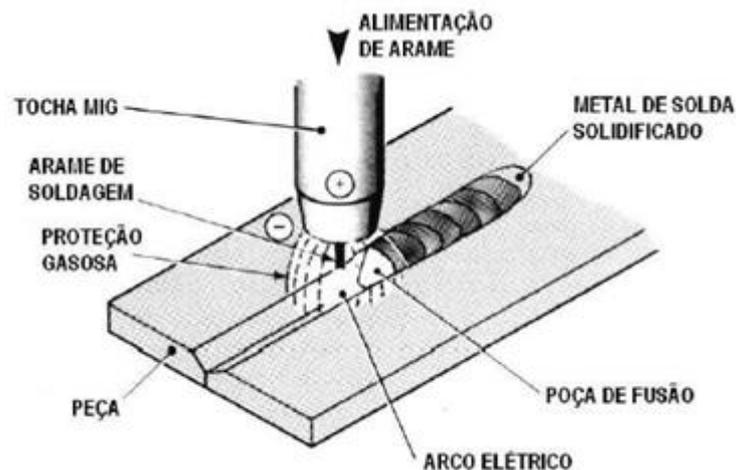


Figura 1: Processo básico de soldagem GMAW (Fortes, 2005)

O processo também pode ser chamado de MIG/MAG e sua diferença depende dos tipos de gases de proteção utilizados na soldagem. O MIG utiliza proteção por gás inerte como Ar e He, ou mistura de gases, já a soldagem MAG

utiliza mistura de um ou mais gases ativos (como por exemplo, o CO₂) com gases inertes ou apenas CO₂ puro (Scotti e Ponomarev, 2014).

O processo GMAW pode ser utilizado nos modos automático, semiautomático e mecanizado, sendo utilizado principalmente no modo semiautomático. Todavia, o seu uso no modo automático, através de robôs industriais tem tido um elevado crescimento (Teske, 2006). Metais como aços carbono, aços de alta-resistência e baixa liga, aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldadas em diferentes posições de forma adequada se forem escolhidos apropriadamente os gases de proteção, os eletrodos e as variáveis do processo (Villani *et al.*, 2006).

A Figura 2 mostra os equipamentos que são utilizados no processo GMAW. A composição básica do sistema é composta por uma fonte de energia, o arame alimentador, a tocha, o cilindro com o gás de proteção e a própria peça a ser soldada (ESAB, 2014).

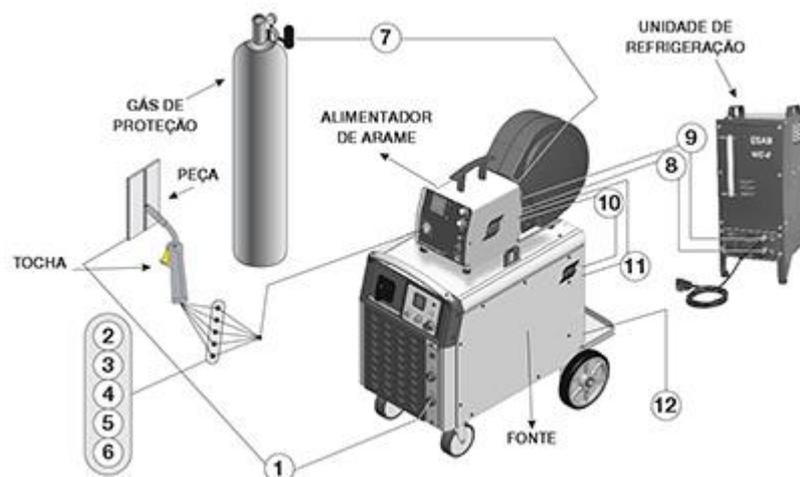


Figura 2: Itens de um sistema de soldagem semiautomática para aplicação GMAW (adaptado ESAB, 2014)

- 1 – Cabo de solda (Negativo)
- 2 – Refrigeração da tocha (entrada de água)
- 3 – Gás de proteção
- 4 – Gatilho da tocha
- 5 – Refrigeração da tocha (retorno da água)
- 6 – Conduíte do arame

- 7 – Gás de proteção vindo do cilindro
- 8 – Saída de água de refrigeração
- 9 – Entrada de água de refrigeração
- 10 – Cabo de comando (alimentador/fonte)
- 11 – Cabo de solda (positivo)
- 12 – Conexão para fonte primária.

De acordo com Scotti e Ponomarev (2014), o processo GMAW tem suas vantagens e desvantagens. As principais vantagens são: elevada taxa de fusão do arame, a possível variação dos modos de transferência metálica e o diâmetro pequeno do eletrodo que permite um arco concentrado e com alto poder de fusão do metal base. Também permite soldagens com pouca escória e grande produtividade por ser uma técnica rápida.

Como desvantagens o processo apresenta alta emissão de calor e luz, o que traz dificuldade de manuseio do equipamento, além da necessidade de se conhecer como regula os parâmetros para que o processo tenha estabilidade. A maior velocidade de resfriamento pode causar trincas e em locais de difícil acesso a técnica não é indicada, pois o bocal da pistola precisa ficar próximo ao metal de base (Barbedo, 2011).

2.1.1 O Arco Voltáico

Para Modenesi *et al.*, (2012) o arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão, pois apresentam como qualidade a concentração adequada de energia para a fusão, fácil controle, baixo custo e nível aceitável de riscos à saúde do operador em relação as normas específicas.

O arco é composto por três regiões: coluna de plasma, regiões anódica e catódica. O transporte de eletricidade dentro do gás ionizado é devido a maior mobilidade dos elétrons, que são emitidos do cátodo em direção ao ânodo (Scotti e Ponomarev, 2008).

Cada região apresenta uma característica e função, e em cada uma dessas regiões ocorre queda de tensão. Na coluna de plasma é onde ocorre menor perda de tensão. Já nas outras regiões o restante da tensão é consumida mais

rapidamente. A região anódica e catódica fica entre a coluna de plasma e o eletrodo consumível e a coluna de plasma e a peça a se soldar, respectivamente (Scotti e Ponomarev, 2014). O esquema das regiões do arco é mostrado na Figura 3.

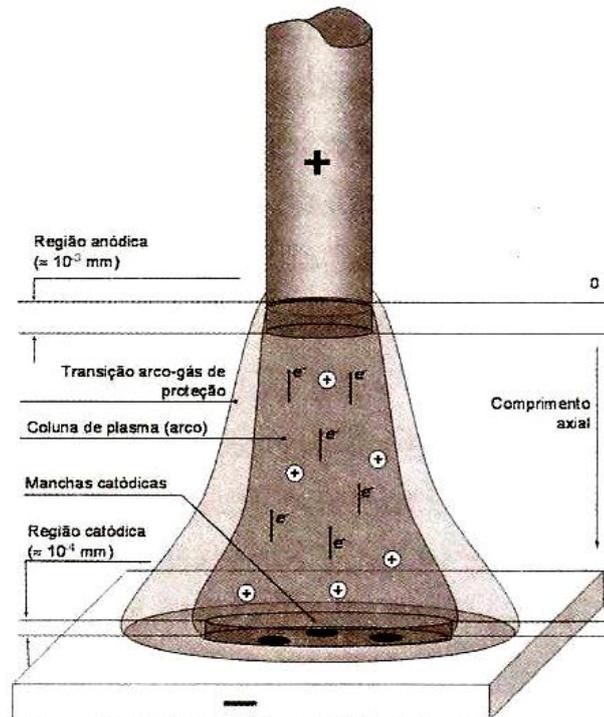


Figura 3: Regiões do arco elétrico (Scotti e Ponomarev, 2014)

No processo GMAW ocorre o fenômeno de emissão catódica ou emissão de campo como o mostrado na Figura 4. Sobre a poça de fusão são formadas camadas de óxidos que possuem ligações elétrons-átomos mais fracas que o próprio metal, permitindo que os elétrons sejam emitidos mais facilmente por essas camadas que vão se tornar positivas. Os elétrons são emitidos da região catódica para a região anódica devido ao alto valor de tensão localizada sobre as camadas de óxido (Scotti e Ponomarev, 2014).

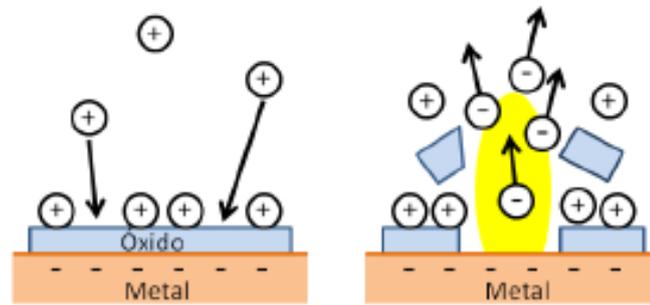


Figura 4: Emissão catódica. Esquerda: fase de agrupamento de elétrons sob a camada de óxido. Direita: quebra localizada da camada de óxido e emissão dos elétrons (adaptado Modenesi e Bracarense, 2007)

Devido ao fenômeno de emissão catódica é que se faz necessário o uso de gases de proteção com adições de óxidos, pois nesse caso o arco elétrico não vai procurar óxidos distantes do seu eixo. Por isso, para aços carbono, que possuem baixa facilidade de oxidação, deve-se usar gases com caráter oxidante (Scotti e Ponomarev, 2008).

2.1.2 A Coluna de Plasma

Scotti e Ponomarev (2014) falam que na coluna de plasma é onde se concentra a elevada energia térmica do arco, sendo essa energia muito elevada no centro da coluna (próxima ao eletrodo) e decaindo para as laterais, conforme Figura 5.

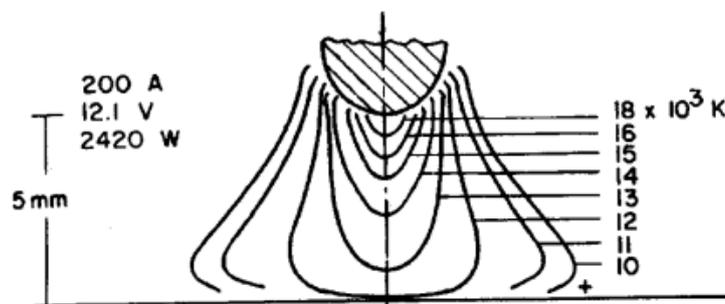


Figura 5: Esquema para o balanço de energia no ambiente da coluna de plasma de um arco (Modenesi *et al.*, 2012)

Isso ocorre devido à troca de calor com o meio externo, ou seja, com o meio ambiente. Essa troca é dada por radiação e convecção para a atmosfera e por convecção para o metal base. Por isso, para manter esse estado energético é preciso que calor seja sempre adicionado. O calor adicionado é resultante de elétrons, com alta energia cinética que colidem com átomos e transferem energia para esses átomos, ionizando-os. Um átomo com baixa energia de ionização requer mais energia vinda dos elétrons, como por exemplo, o H₂ e He que possuem poucos elétrons e necessitam de mais energia (Scotti e Ponomarev, 2014).

Os parâmetros de soldagem influenciam nesse calor gerado, quanto maior a corrente mais fácil de um elétron colidir com o mesmo átomo, sendo assim, esse mesmo elétron vai poder carregar menos energia no processo. Também é dito que, quanto mais átomos necessitam de reionização por conta do calor que é perdido para o meio, maior deve ser a tensão (Scotti e Ponomarev, 2014).

A geometria do arco também influencia a troca de calor, quanto maior o arco, ou seja, quanto mais longa a coluna, maior área para a troca de calor, resultando em maior desionização. Nesse caso, terá menor probabilidade dos elétrons se chocarem para fazerem a reionização (Scotti e Ponomarev, 2014).

Sendo assim a tensão gerada na coluna de plasma depende do potencial de ionização do gás de proteção, da sua capacidade de trocar calor com o meio externo, da corrente de solda e da geometria do arco (Scotti e Ponomarev, 2014).

2.1.3 Variáveis do Processo

As variáveis são importantes para determinar as características finais do cordão de solda. Elas são responsáveis pela ocorrência de alguns tipos de defeitos, descontinuidades e podem influenciar também nas propriedades finais da peça a ser soldada. Dimensões inadequadas do cordão podem fazer com que a estrutura soldada falhe dependendo da carga que irá ser submetida (Barbedo, 2011).

Essas variáveis também influenciam a estabilidade do arco e a penetração da solda.

Esses parâmetros podem ser controlados separadamente, porém o efeito de um está diretamente ligado à atuação da outro (Barbedo, 2011).

A seguir são citadas as variáveis mais importantes para o processo.

2.1.3.1 Tensão de Soldagem

A tensão de soldagem é responsável por controlar diretamente o comprimento do arco, além disso, de acordo com Barbedo (2011) a tensão de soldagem influencia tanto na transferência metálica quanto na geometria do cordão. Também é responsável pela profundidade de penetração e pela formação de respingos. Quando ocorre uma diminuição dessa tensão no arco, o comprimento do arco é menor, a penetração na solda diminui e os cordões ficam mais estreitos. Mas também quando ocorre o seu aumento exagerado, o comprimento do arco também aumenta, favorecendo a ocorrência de porosidades (Gomes, 2006).

Se a tensão for reduzida excessivamente, vai ser mais difícil fundir o arame eletrodo, assim o arco se torna mais instável.

2.1.3.2 Corrente de Soldagem

A corrente influencia diretamente a taxa de deposição, a geometria do cordão de solda e o modo de transferência metálica (Barbedo, 2011). A escolha da corrente vai depender da espessura da peça a ser unida, das características necessárias ao cordão e do diâmetro do eletrodo. Uma corrente muito baixa pode diminuir a estabilidade do processo.

Mantendo-se constantes outras variáveis do processo e aumentando a corrente, ocorrem maior penetração e profundidade na solda resultando em uma maior taxa de deposição.

A Figura 6 mostra a relação entre a taxa de deposição e a corrente para arames do grupo T-1, que utilizam misturas ou CO₂ puro como gás de proteção (Joaquim, 2001). Para maiores valores de corrente, quanto maior o diâmetro do eletrodo maior será a taxa de deposição da solda. Os arames mais grossos suportam uma intensidade de corrente maior em comparação aos arames mais estreitos.

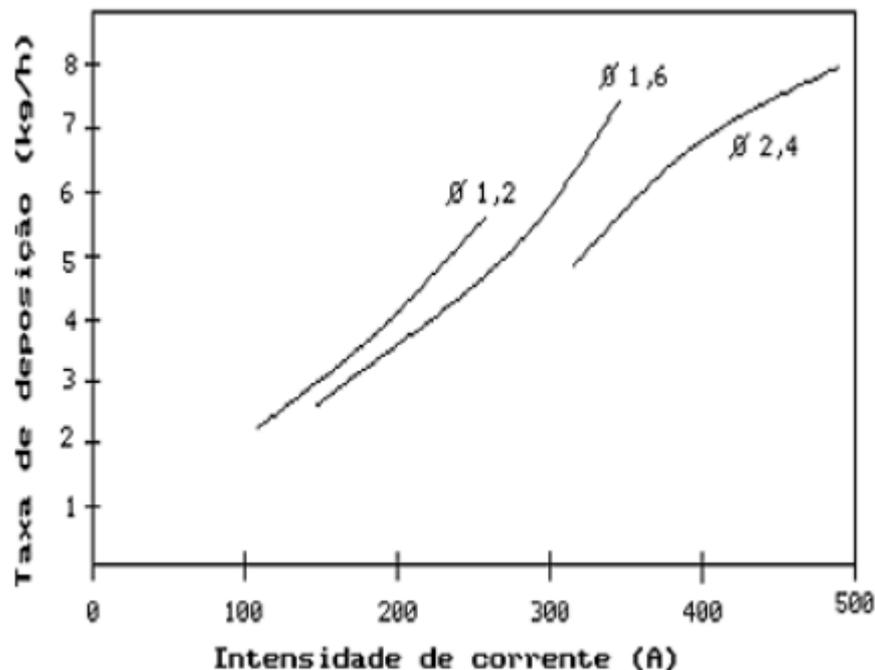


Figura 6: Relação entre a taxa de deposição e a corrente de soldagem para arames do grupo T-1 (Joaquim, 2001)

No processo GMAW a corrente se relaciona à velocidade de alimentação (desde que a extensão do eletrodo seja constante). Quando modificamos a velocidade de alimentação estamos alterando também a corrente na mesma proporção (Giraldo, 2008).

2.1.3.3 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta soldada. A penetração é máxima em velocidades intermediárias, pois primeiro aumenta e depois diminui. Com uma velocidade muito baixa, a quantidade de material depositado aumenta, porém a poça fica com dimensões elevadas fazendo com que a penetração seja baixa, mas em contrapartida, se for utilizado uma velocidade muito elevada, a quantidade de calor transferido para o metal de base é reduzida e a penetração também diminui, podendo causar defeitos no cordão (Barbedo, 2011).

2.1.3.4 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. A Figura 7 representa esquematicamente a extensão do eletrodo (ESAB, 2005).

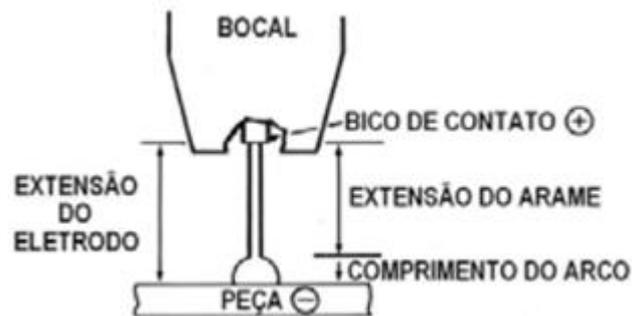


Figura 7: Representação esquemática da extensão do eletrodo (adaptado de ESAB, 2005)

Essa extensão do eletrodo está relacionada à corrente de soldagem necessária para fundir o arame a certa velocidade de soldagem. Quando aumentamos essa distância, o aquecimento da região por efeito Joule (aumento da resistência elétrica) também aumenta, e a corrente diminui. Isso é mostrado na Figura 8 (ESAB, 2005).



Figura 8: Efeito da distância entre o bico de contato e a peça na corrente de soldagem (adaptado de ESAB, 2005)

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. A Figura 9 mostra o comportamento da extensão do eletrodo em diferentes distâncias (Morganti, 2013).

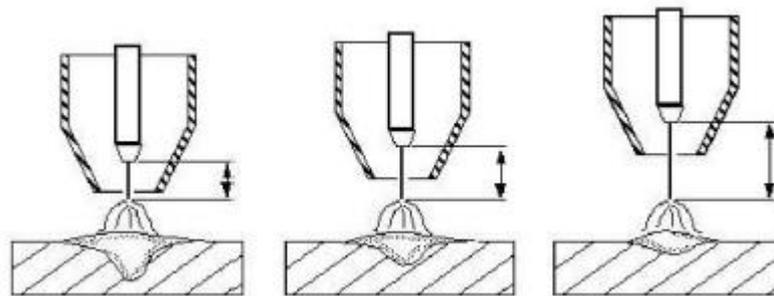


Figura 9: Diferentes distâncias entre a extremidade do bico de contato e a peça (Morganti, 2013)

A distância do bico de contato também influencia na taxa de deposição. Segundo Höhn (2010), quanto maior a DBCP é esperado maior taxa de deposição (Figura 10).

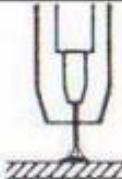
			
DBCP, mm	10	18	25
I, A	300	300	300
TD, kg/h	4.2	5.0	5.8

Figura 10: Efeito da distância bico de contato peça na corrente e na taxa de deposição (Höhn, 2010)

2.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Para a soldagem que utiliza metal de adição, a forma como se dá a transferência metálica do metal para a peça constitui um fator de elevada importância para o processo, pois está diretamente ligada ao nível de respingos e fumos, a capacidade de utilização do processo fora da posição plana, o formato dos cordões e a estabilidade do processo (Modenesi, 2009).

A transferência metálica se processa em qualquer polaridade, com corrente contínua ou alternada e até mesmo contra a ação da gravidade, como é o caso da soldagem sobre cabeça (Modenesi, 2009).

Os principais modos de transferência de metal são: Curto circuito, globular, *spray* e corrente pulsada.

A Tabela 1 apresenta as principais características dos modos de transferência metálica aplicados ao processo GMAW (Acesita, 2011).

Tabela 1: Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW (adaptado Acesita, 2011)

Modo de transferência	Tensão no arco	Densidade de corrente	Energia de soldagem	Soldagem fora da posição	Penetração
Curto-circuito	Baixa	Baixa	Baixa	Sim	Pequena
Globular	Média	Baixa	Média	Não	Média
<i>Spray</i>	Alta	Alta	Alta	Depende	Grande
Pulsada	Alta	Média	Média	Sim	Grande

Utilizando argônio como gás de proteção, a transferência por curto-circuito é estável para baixos valores de tensão e uma ampla faixa de corrente, enquanto que para a transferência globular é necessário o uso de maiores valores de tensão e a corrente deve ser mais baixa. Já para a transferência em *spray*, devem ser utilizados altos valores de corrente e tensão. Na Figura 11 é mostrado um esquema com as diferentes transferências usadas no GMAW (Modenesi e Bracarense, 2007).

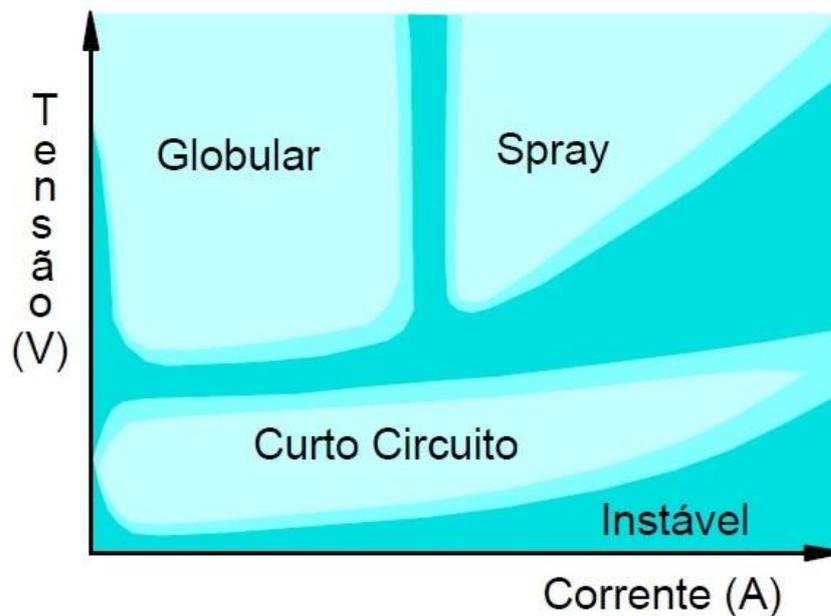


Figura 11: Esquema das condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para GMAW com um gás de proteção a base de argônio (Modenesi e Bracarense, 2007)

2.2.1 Forças atuantes na transferência metálica

A gota - metal líquido a ser transferido do eletrodo para a poça - está submetida à ação de forças, assim como a poça de fusão. Essas forças vão contribuir ou dificultar o seu destacamento. Dois mecanismos são encontrados na literatura para descrever a formação e o destacamento da gota de metal: a Teoria de Equilíbrio das Forças Estáticas e a Instabilidade de *Pinch* (Scotti e Ponomarev, 2014).

A teoria de equilíbrio das forças estáticas diz que a gota é submetida a uma série de forças - Força gravitacional, força eletromagnética, força devido à tensão superficial do metal fundido, força de arraste dos gases e força de vaporização (Figura 12) e essa gota só será transferida se o somatório das forças de destacamento superar o somatório das forças de retenção.

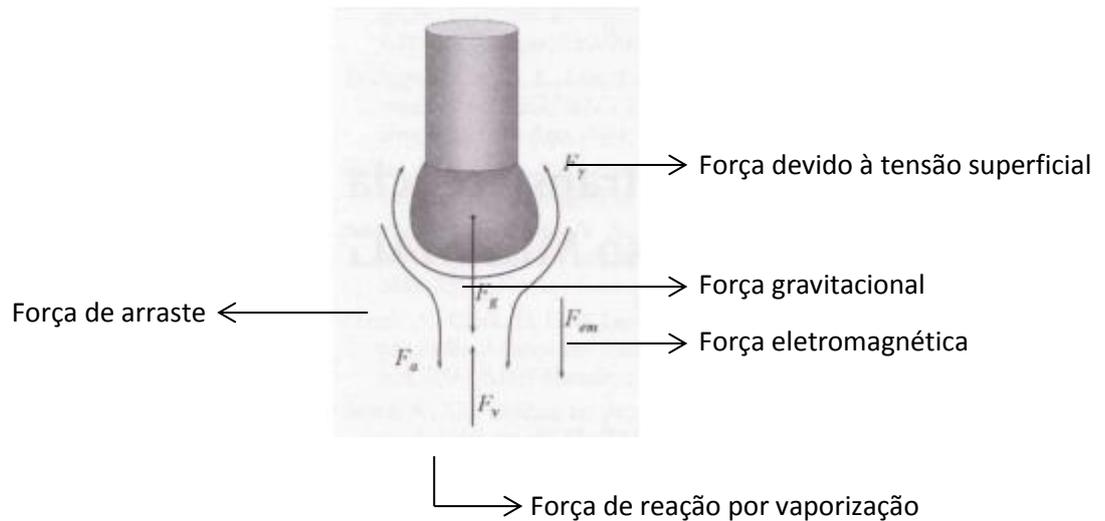


Figura 12: Forças governantes da transferência metálica no processo GMAW (Adaptado Scotti e Ponomarev, 2014)

A teoria de equilíbrio descreve a transferência do metal em intervalos de corrente até a corrente de transição, ou seja, quando o modo de transferência ainda é globular. A partir desse valor de corrente de transição, a teoria da instabilidade de *Pinch* é mais indicada para descrever o fenômeno de transferência, sendo utilizada para descrever a transferência no modo *spray* (Scotti e Ponomarev, 2014).

2.2.1.1 Força gravitacional (F_g)

A força gravitacional é originada pela ação da gravidade, que depende da massa e por isso é governada pela dimensão e densidade do material da gota, conforme pode ser observado na equação 1, que assume que a gota cresça idealmente como uma esfera.

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

onde:

ρ é a densidade do metal líquido;

g é a aceleração da gravidade;

d é o diâmetro da gota.

A força da gravidade pode atuar de forma favorável ou não, dependendo da posição da soldagem. De acordo com a Figura 13 quando a solda é realizada na

posição plana (eletrodo a 0°) até a posição horizontal (eletrodo a 90°) a força da gravidade atuará no sentido de destacamento da gota. Na posição horizontal até vertical ou sobrecabeça (90° a 180°) a força da gravidade agirá contra o destacamento da gota perturbando a transferência (Scotti e Ponomarev, 2014).

Essa força continua agindo na solda mesmo após o destacamento (Scotti e Ponomarev, 2014).

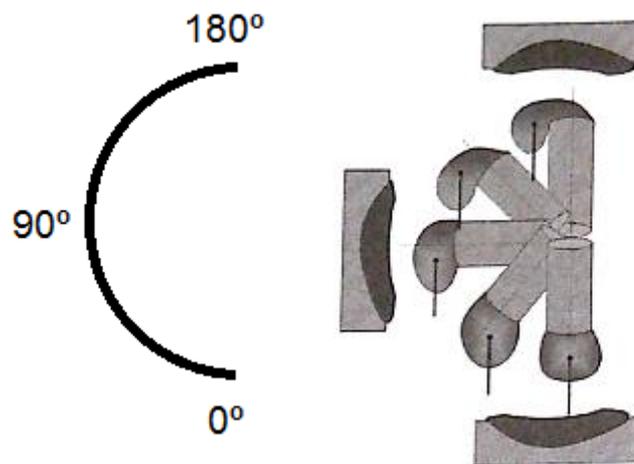


Figura 13: Ilustração da força gravitacional e sua atuação no destacamento da gota de acordo com a posição da soldagem (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2014)

2.2.1.2 Força devido à tensão superficial (F_V)

No interior do líquido a força resultante sobre cada átomo é pequena ou praticamente nula, porém, sobre os átomos da superfície desse líquido a resultante aponta para o interior, devido à densidade molecular dentro do líquido ser maior do que um gás ou plasma.

A força devido à tensão superficial retém a gota na ponta do eletrodo, agindo de forma contrária ao seu destacamento, essa tensão também cresce proporcional ao diâmetro da gota. Se não houvesse a força da gravidade que age de maneira contrária à tensão superficial, o volume da gota cresceria infinitamente. Mas como existe F_V crescendo em proporção direta com o diâmetro do eletrodo (retendo a gota) e a F_g crescendo em proporção do diâmetro do eletrodo ao cubo, vai chegar um

momento em que a gota irá se destacar, como ilustrado na Figura 14. O diâmetro em que o fenômeno do destacamento acontece é chamado de diâmetro crítico (Scotti e Ponomarev, 2014; Fogliatto 2013).

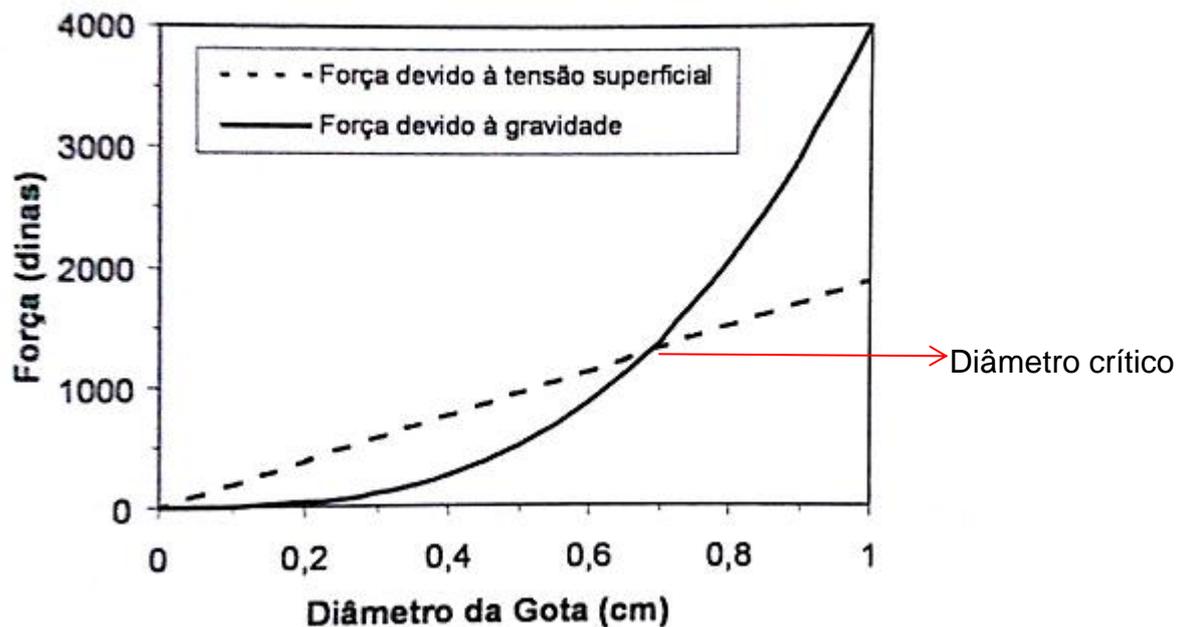


Figura 14: Crescimento competitivo entre as forças da gravidade e, devido à tensão superficial, mostrando o diâmetro crítico em que a gota se destaca (adaptado Scotti e Ponomarev, 2014)

2.2.1.3 Força eletromagnética (f_{em})

Um condutor gera ao seu redor um campo magnético B que induz forças radiais (f_{em}) no sentido do centro do condutor. Essas forças são chamadas de forças eletromagnéticas ou forças de Lorentz, que aumentam de valor com o aumento da densidade da corrente, conforme equação 2.

$$f_{em} = \mu(I \times B) \quad (2)$$

onde:

μ é a permeabilidade magnética do material do condutor;

I é a densidade de corrente;

B é o vetor intensidade de fluxo.

Para uma gota de metal em estado líquido, a força tende a comprimi-la. Essa compressão é dependente do raio do condutor, sendo maior para menores seções transversais de condução (menor raio) de acordo com a equação 3 (Machado 1996; Scotti e Ponomarev, 2014).

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

onde:

μ é a permeabilidade magnética do material;

I é a intensidade de corrente;

R é o raio da gota;

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

Existem dois momentos de influência da f_{em} sobre a gota. Primeiro durante a sua formação e depois no seu destacamento. Pela Figura 15, quando a corrente é alta, há mais concentração de fluxo de corrente na parte de cima da gota ($R_2 > R_1$), a maior pressão nessa região vai impulsionar o volume de crescimento da gota no sentido do destacamento. Já no caso de baixa corrente, a maior concentração de fluxo se dá na parte de baixo da gota ($R_4 < R_3$), fazendo com que a f_{em} empurre o volume da gota contra o arame (Scotti e Ponomarev, 2014).

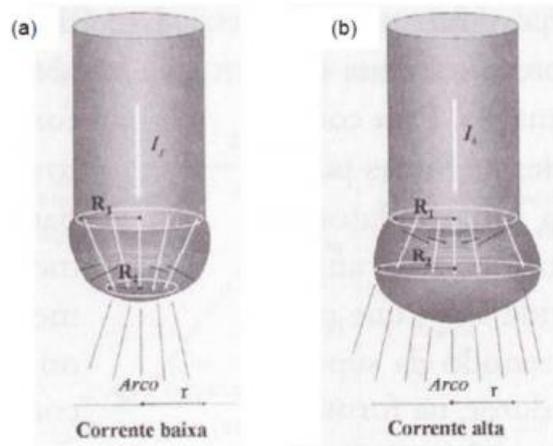


Figura 15: Geração das forças eletromagnéticas (radiais) na gota do metal líquido de forma cilíndrica (Scotti e Ponomarev, 2014)

Quando a gota alcança um diâmetro próximo ao seu diâmetro crítico, inicia-se a estricção da gota como mostrado na Figura 16. Ocorre uma redução da seção transversal próximo ao eletrodo e um crescimento da densidade de corrente de forma inesperada, gerando uma grande pressão. A gota é conduzida favorecendo o seu destacamento, esse fenômeno é conhecido como efeito *Pinch* (Slania, 1996).

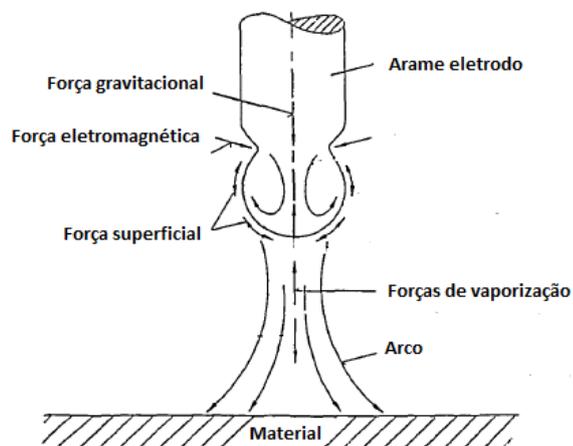


Figura 16: Ilustração do efeito da f_{em} no processo de empescoçamento (adaptado de Slania, 1996)

O estrangulamento brusco e a reação ao movimento do metal líquido na direção do arame em estado sólido dão um impulso na gota, facilitando o destacamento.

2.2.1.4 Força de arraste (F_a)

Esse tipo de força ocorre devido ao arraste exercido pelo fluxo de gás de proteção na gota metálica. Por questões aerodinâmicas, depressões são geradas sob a gota (vórtices) e fazem com que esta seja sugada e arrastada pelo fluxo de proteção, como mostrado na Figura 17 (Wainer *et al.*, 2002).

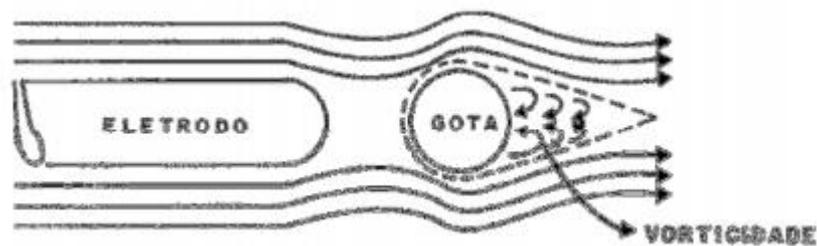


Figura 17: Linhas de fluxo do gás de proteção através da gota de metal (Wainer *et al.*, 2002)

Essa força sempre contribui para o destacamento da gota, uma vez que a direção do fluxo do jato plasma é sempre do eletrodo para a poça de fusão, independente da posição de soldagem.

De forma parecida com a força da gravidade, a força de arraste continua agindo mesmo depois que a gota se destaca, pois a velocidade do jato de plasma é sempre maior do que a gota em viagem. Essa força é crescente à medida que se aproxima da chapa.

A intensidade da força de arraste é dependente do diâmetro da gota, da densidade e da velocidade do jato de plasma e do coeficiente de arraste do sistema (Scotti e Ponomarev, 2014; Fogliatto, 2013).

2.2.1.5 Força de vaporização (F_v)

Ocorre devido à vaporização dos componentes do metal do eletrodo na interface arco-gota. Nessa região, são gerados vapores metálicos devido ao intenso calor. A aceleração térmica das partículas de vapor no interior do arco plasma provoca uma força que se opõe ao destacamento da gota.

Se o acoplamento do arco se der somente na calota inferior da gota, os jatos vão exercer uma força de reação sobre a gota, mantendo-a mais tempo retida, levando a um aumento do seu diâmetro crítico e agregação de volume à gota do metal. Quanto menor essa interface arco-gota, mais pontual é a atuação desta força de reação, e se essa força ocorrer fora da linha de centro da gota, pode desviá-la de sua trajetória normal como mostrado na Figura 18, facilitando a geração de respingos.

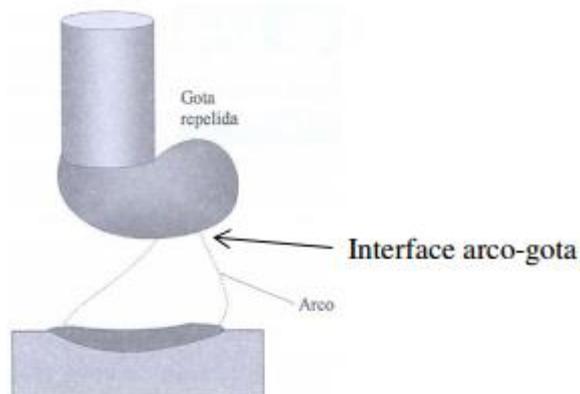


Figura 18: Esquemática do desvio da gota devido a arco com conexão concentrada e fora da linha de centro (Scotti e Ponomarev, 2014)

Esse fenômeno é observado no modo de transferência por gotas repelidas (globular repulsivo), que ocorre para níveis de corrente ligeiramente acima das utilizadas na transferência globular (Fogliatto, 2013).

Os modos de transferência podem ser classificados de acordo com a forma como o material é transportado do eletrodo para a peça, por voo livre e por contato ou também chamada de transferência por curto circuito. A Tabela 2 apresenta os tipos de modo de transferência e a força principal atuante sobre a gota metálica.

Tabela 2: Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo GMAW (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2014)

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

2.2.2 Transferência por Curto Circuito

Na transferência por curto circuito o material é transferido para a poça de fusão somente quando ocorre contato do arame com a poça, ocorrendo um curto circuito e o arco é extinto nesse momento. Ocorre em níveis relativamente baixos de corrente e tensão, possibilitando assim a soldagem de pequenas espessuras. Permite também, soldagem em todas as posições (Quites, 2002).

Na Figura 19 está ilustrado como os sinais do arco na transferência por curto-circuito se comportam durante a solda. No primeiro momento, em A, o arco encontra-se aberto e com valor baixo de corrente. Em B, a gota toca a poça de fusão

e ocorre o curto-circuito. Ocorre um pico de tensão e nesse período o arco é extinto. A tensão começa a crescer e a corrente ainda cresce em C, até que em D ocorre o fim do período de curto circuito e os valores de tensão e corrente voltam para os valores anteriores (Modenesi *et al.*, 2012). A frequência de curtos-circuitos é de 20 a 200 vezes por segundo (Scotti e Ponomarev, 2008).

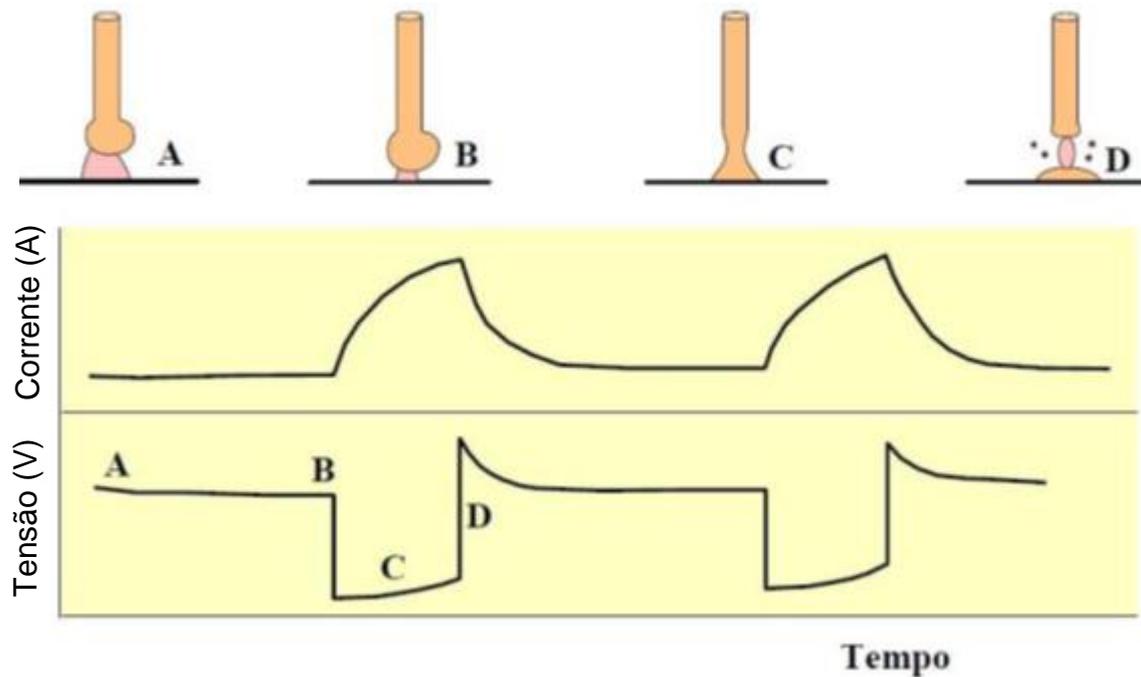
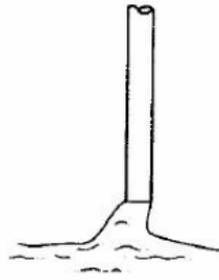


Figura 19: Transferência por curto-circuito (Modenesi *et al.*, 2012)

Para uma regularidade na transferência metálica devem ser ajustados os parâmetros do processo para ter um equilíbrio entre a velocidade de avanço do eletrodo no arco e a velocidade de fusão (Dutra e Baixo, 1995).

Esse tipo de transferência é conhecido como transferência por contato e Figura 20 mostra como o material é desprendido do arame até a poça de fusão.



Curto-circuito

Figura 20: Esquema de desprendimento da gota no arame (Modenesi *et al.*, 2012)

2.2.3 Transferência Globular

Os níveis de tensão são mais elevados que na transferência por curto circuito. A soldagem só é permitida na posição plana, isso porque as gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão principalmente pela ação da gravidade, o que limita a soldagem apenas nessa posição. O diâmetro das gotas é maior que o diâmetro do arame. Pode acarretar falta de penetração, falta de fusão e respingos (Quites, 2002). Possui baixa frequência de destacamento das gotas (1 a 10 gotas/segundo).

A Figura 21 permite visualizar como se comportam os parâmetros de corrente e tensão na transferência globular. É perceptível que os valores de corrente são um pouco maiores em relação à transferência por curto circuito, porém elas são mantidas em uma faixa de valores e variam pouco. Já a tensão ocorre em valores moderados a altos e também permanecem em uma faixa de valores constantes (Modenesi *et al.*, 2012).

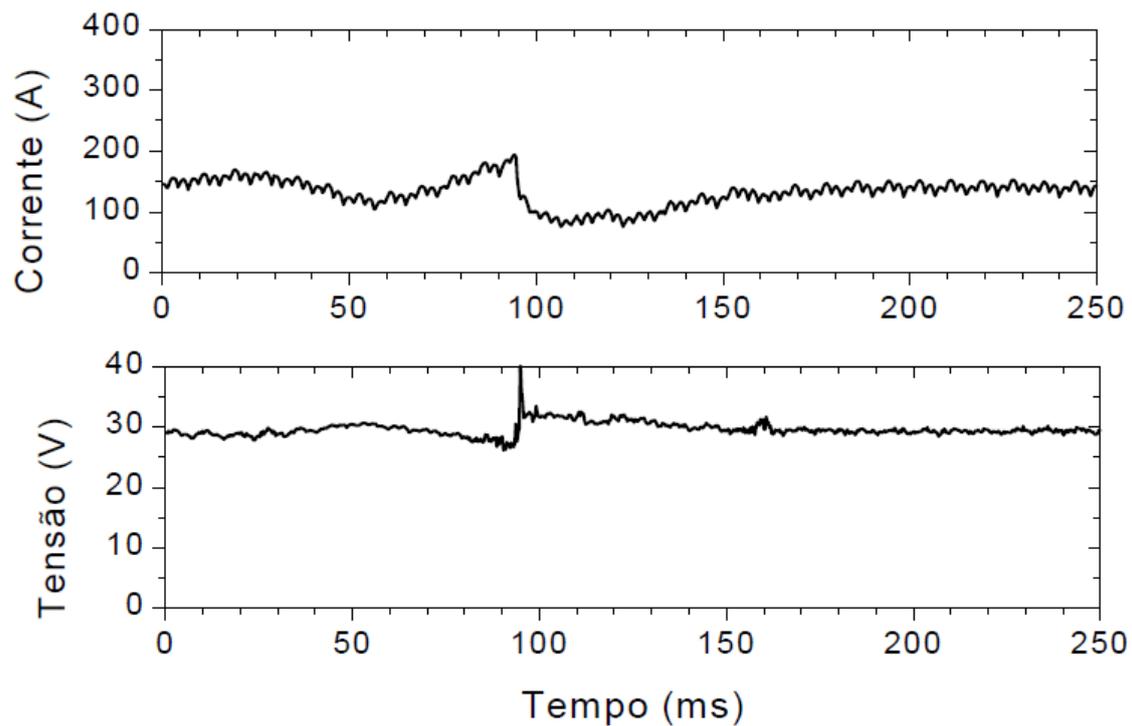
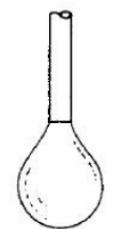


Figura 21: Oscilogramas de corrente de um processo com transferência globular em 250ms. Arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: CO₂ (Modenesi *et al.*, 2012)

A Figura 22 mostra o esquema de destacamento da gota na soldagem utilizando transferência globular, também conhecida como transferência por voo livre.



Globular

Figura 22: Esquema de desprendimento da gota no arame (Modenesi *et al.*, 2012)

2.2.4 Transferência por *Spray*

De acordo com Modenesi e Nixon (1994), a partir do globular, com aumento da corrente de soldagem, o diâmetro das gotas de metal que se transferem para a

peça diminui, até um valor de corrente em que a transferência passa de globular para *spray*. Essa corrente é conhecida como corrente de transição, e representa os limites entre dois modos de transferência (Figura 23). As gotas pequenas são destacadas da ponta do arame por forças magnéticas que atuam nas direções radiais e axiais. O resultado da solda é um bom acabamento do cordão e praticamente sem respingos. Por usar níveis elevados de corrente, a soldagem por *spray* torna-se difícil nas posições vertical e sobre cabeça. Certa quantidade de oxigênio no gás de proteção pode manter a estabilidade do arco.

Nesse tipo de transferência, as gotas sofrem ação de forças eletromagnéticas, que fazem com que as gotas diminuam em tamanho e reduzam sua aceleração. Essa redução do tamanho da gota é acompanhada pelo aumento do número de gotas que se desprendem do eletrodo (Modenesi e Nixon, 1994). A taxa de transferência das gotas pode variar de um pouco menos de 100 a centenas de gotas por segundo, quando ocorre um aumento na velocidade de alimentação de aproximadamente 42 a 340 mm/s (2,4 a 20,4 m/min) (Resende, 2007).

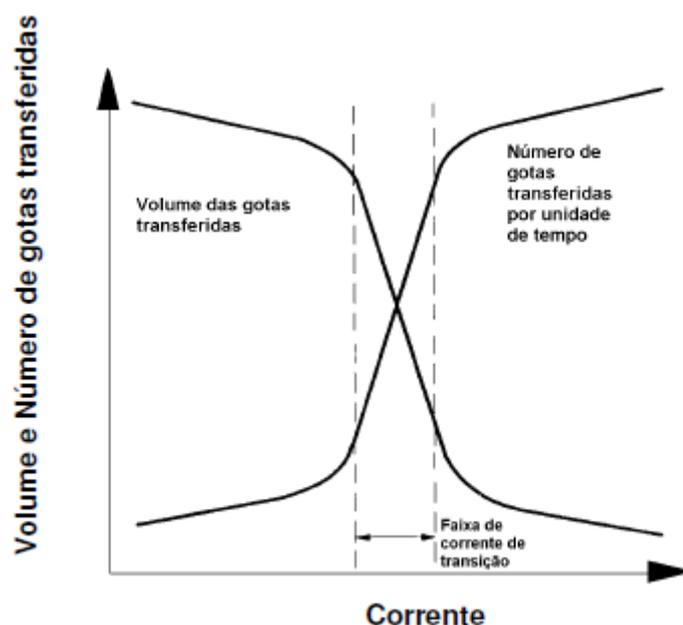


Figura 23: Volume e número de gotas transferidas por unidade de tempo com a corrente de soldagem (Marques, 1991)

A Figura 23 mostra que quando os valores de corrente são abaixo da corrente de transição, o volume das gotas formadas é grande, enquanto que o número de gotas transferidas para o metal por unidade de tempo é baixa. Nesse período com o

aumento da corrente as variações dessa frequência são muito pequenas. Na faixa de corrente de transição as variações são bruscas e consideráveis. Sendo assim, um pequeno aumento na corrente gera um grande aumento na frequência de transferência das gotas e uma queda elevada no volume das gotas. Acima da corrente de transição as suas variações voltam a ser pequenas como anteriormente (Marques, 1991).

A necessidade de correntes muito altas dificulta ou inviabiliza a soldagem de chapas finas, pois pode furar o metal de base, e também a soldagem fora da posição plana, pela formação de uma grande poça de fusão de difícil controle (Modenesi, 2011). Esse tipo de transferência apresenta excelentes características operacionais, mas é restrita para usos na soldagem de juntas de maior espessura. Para outros tipos de soldagens, deve ser trabalhada, usualmente, a transferência por curto-circuito (Modenesi, 2009).

As correntes e tensões para esse tipo de transferência podem chegar a 150 a 500 A e 24 a 40 V, respectivamente. O oscilograma da Figura 24 mostra os valores de tensão e corrente em função do tempo utilizando arame ER 70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Ar+25%CO₂. Gases inertes favorecem esse tipo de transferência (Modenesi *et al.*, 2012).

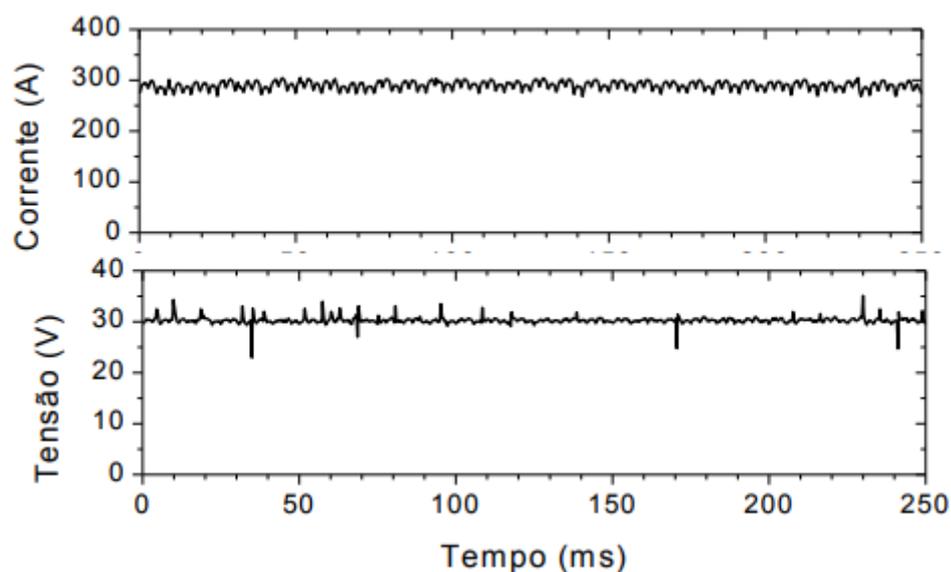


Figura 24: Oscilograma de um processo com transferência *spray*. Arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: Ar+25%CO₂ (Modenesi *et al.*, 2012)

A transferência em *spray* também é conhecida como transferência por voo livre, porém, nesse caso é tida como goticular. O esquema abaixo representa os tipos de destacamento da gota da transferência em *spray* para diferentes valores de corrente. O destacamento projetado (Figura 25a) com corrente intermediária, o destacamento com alongamento (Figura 25b) que possui corrente mais baixa e o destacamento rotacional que utiliza elevada corrente (Figura 25c) (Modenesi *et al.*, 2012).

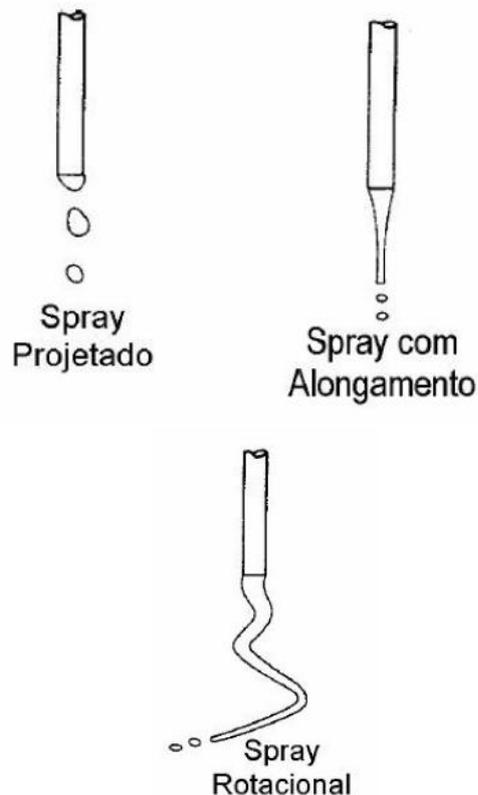


Figura 25: a) *Spray* Projetado; b) *Spray* com Alongamento; c) *Spray* Rotacional (Modenesi *et al.*, 2012)

O modo projetado ocorre quando se utiliza corrente próxima da corrente de transição. As gotas possuem diâmetro igual ou um pouco menor que o diâmetro do eletrodo. A taxa de transferência das gotas é maior do que no modo globular (Resende, 2007). A Figura 26 apresenta uma filmagem de alta velocidade que mostra como ocorre o destacamento da gota no projetado.

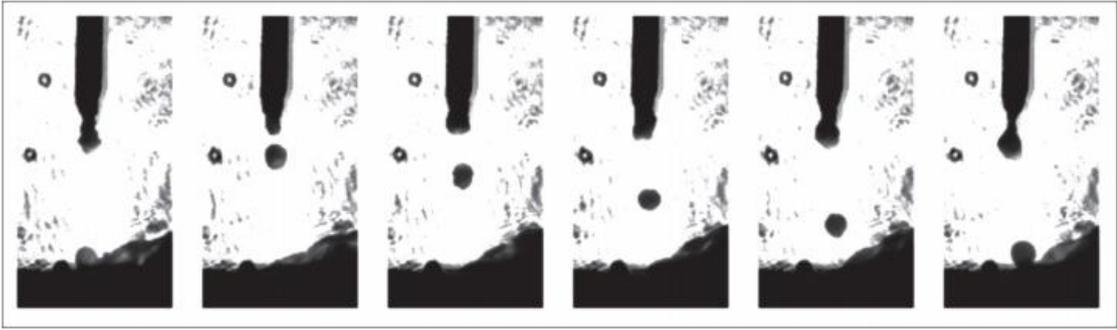


Figura 26: Transferência por *spray* no modo projetado (Souza, 2010)

No modo de transferência *spray* com alongamento não ocorre respingos e as gotas menores são transferidas a altíssimas taxas. Esse modo apresenta elevado aporte de calor e também alta taxa de fusão, sendo indicado para soldagem de chapas grossas na posição plana (Souza, 2010). A Figura 27 apresenta a sequência de destacamento da gota na transferência em *spray* com alongamento no momento da soldagem (Souza, 2010).

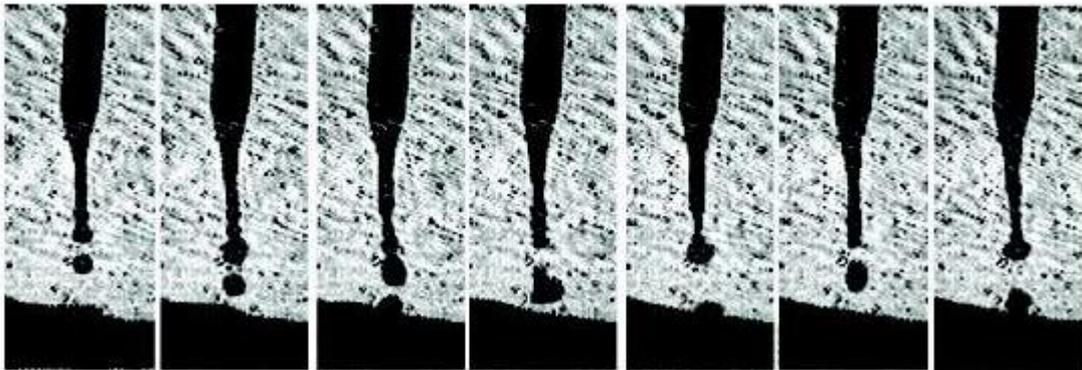


Figura 27: Gotas durante a transferência no modo *spray* com alongamento (Souza, 2010)

O outro modelo de transferência por *spray* é conhecido como rotacional. Nela o uso de altas densidades de corrente faz com que o eletrodo comece a rotacionar. Ocorre formação de respingos e suas gotas pequenas são transferidas em altas taxas. A rotação do eletrodo causa instabilidade ao processo e por isso esse modo não é aconselhado para soldagem (Souza, 2010).

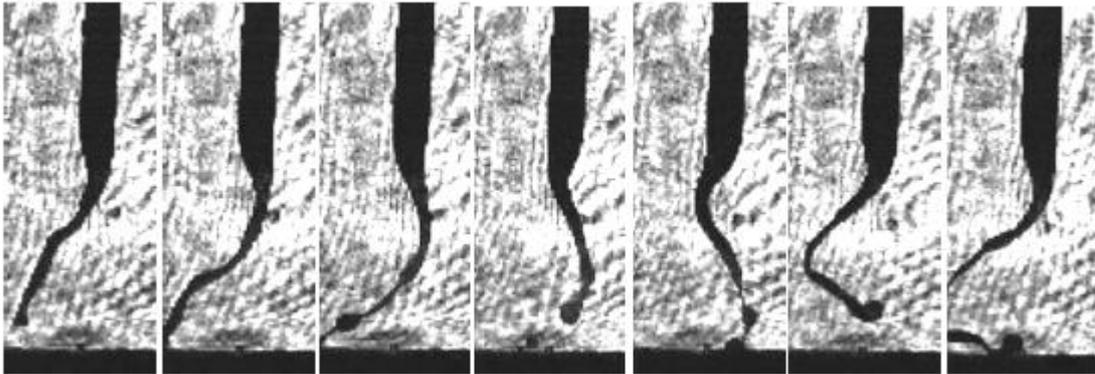


Figura 28: Gotas durante a transferência no modo *spray* com rotação (Souza, 2010)

2.2.4.1 Relação entre parâmetros de soldagem e gases de proteção na Transferência por *Spray*

Uma condição necessária para que a transferência *spray* ocorra é que a corrente de soldagem ultrapasse uma faixa de valores, denominada corrente de transição. Quando a corrente ultrapassa essa faixa, ocorre significativa redução do tempo da formação da gota até o seu desprendimento, gerando um aumento súbito da frequência de transferência (Scotti e Ponomarev, 2014).

A corrente de transição depende, principalmente, do diâmetro e do material do eletrodo utilizado na solda, do comprimento desse eletrodo e do tipo de gás de proteção utilizado, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Faixas de corrente de transição típicas para diferentes materiais e diâmetros do eletrodo e gases de proteção (Scotti e Ponomarev, 2014)

Material do arame-eletrodo	Atmosfera protetora	Diâmetro de arame-eletrodo (mm)	Corrente de transição (A)
		0,6	130 – 135
		0,8	150 – 160
		0,9	160 – 170
	98%Ar + 2%O ₂	1,0	180 – 190
		1,1	210 – 230
		1,2	220 – 240
		1,6	260 – 280
		0,8	130 – 135
	95%Ar + 5%CO ₂	1,0	180 – 190
		1,2	230 – 250
		1,6	270 – 285
Aços-carbono		0,8	145 – 155
	92%Ar + 8%CO ₂	1,0	190 – 200
		1,2	240 – 260
		1,6	280 – 295
		0,8	150 – 160
	85%Ar + 15%CO ₂	1,0	195 – 205
		1,2	250 – 270
		1,6	285 – 300
		0,8	155 – 165
	80%Ar + 20%CO ₂	1,0	200 – 210
		1,2	265 – 280
		1,6	320 – 345

Quando aumentamos o diâmetro do eletrodo aumentamos o valor da corrente de transição. Arames com diâmetros maiores suportam uma intensidade de corrente maior em comparação aos arames mais finos.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008) o gás de proteção também irá influenciar a corrente de transição.

O mais utilizado, o argônio, é monoatômico, inerte e não reage com outros elementos para formar compostos. É obtido diretamente da atmosfera. É facilmente separado como um subproduto, durante a produção em larga escala do oxigênio e nitrogênio puro, estando disponível a um custo modesto (Tusek e Suban, 2000).

O dióxido de carbono é o único gás oxidante usado sem mistura de gás inerte para proteção de soldas no processo GMAW. A grande penetração na junta soldada e o baixo custo são as características que favorecem o uso do CO₂ como gás de proteção (Wainer *et al.*, 1992). O CO₂ garante boa velocidade de soldagem, boa penetração, boa resistência e um custo baixo em relação aos gases inertes, mas pode formar um cordão com muito respingo, fator este que pode ser fonte de problemas quando se necessita de um bom aspecto final da peça a ser soldada.

O nitrogênio é pouco utilizado. É considerado de baixa reatividade por fornecer uma proteção não oxidante. Quando aplicado para aços, misturas de argônio com 4 a 6% de nitrogênio resultam em porosidade no cordão de solda. Além disso, reduz a ductilidade e a tenacidade da solda. O nitrogênio é obtido em grande quantidade, a um custo relativamente baixo, como um subproduto da produção do oxigênio puro (Linnert, 1994).

As misturas de Argônio com baixos valores de O₂ (até 5%) ou com CO₂ fazem com que a transferência *spray* ocorra mais facilmente. Quando aumentamos o teor de CO₂, a corrente de transição sobe, porém, para teores de 18-20% de CO₂, esse tipo de transferência é dificilmente alcançada.

De um modo geral, Bracarense *et al.*, (1994) apresentou em seu trabalho uma relação entre os parâmetros de soldagem utilizando diferentes materiais. De acordo que se reduz o diâmetro do eletrodo, menor será a corrente, menor tensão, então será necessária uma maior velocidade de soldagem já que a espessura do material a ser soldado é pequena, o calor transferido para o metal de base é pequeno e a penetração diminui, pois se a penetração for elevada pode causar deposição excessiva.

A Tabela 4 apresenta parâmetros típicos empregados para aços carbono e aço baixa liga utilizando transferência por *spray*. O diâmetro do eletrodo e o gás de proteção são fatores determinantes para se obter a faixa de valores de corrente de transição, mas esta também depende de outros fatores operacionais como o tipo do material a ser soldado, a espessura desse material e a velocidade de alimentação do arame (Bracarense *et al.*, 1994).

Tabela 4: Parâmetros típicos de soldagem para aços
(Adaptado de Bracarense *et al.*, 1994)

Aço carbono e aço baixa liga - Spray						
Espessura do material (mm)	Tipo de Junta	Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade do arame (mm/s)	Velocidade de soldagem (mm/s)
3,2	Topo	0,89	190	26	148	8-11
5,4	Topo	1,1	320	29	169	7-9
9,5	Topo	1,1	300	29	154	5-7
9,5	Ângulo	1,6	300	26	87	4-6
12,7	Ângulo	1,6	320	26	82	7-9
19,1	Ângulo	1,6	360	27	99	4-6

No trabalho de Resende *et al.*, (2009) foi analisado a influência dos teores de CO₂ e O₂ na corrente de transição globular-*spray* utilizando misturas à base de argônio durante o processo GMAW. Foram realizadas soldagens com misturas binárias (Ar+CO₂), conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Valores ajustados para o experimento
(adaptado Resende *et al.*, 2009)

Ensaio	Gás de proteção	Velocidade de alimentação (m/min)	Tensão de referência (V)
01	Ar+2%CO ₂	5,6,7 e 8	32
02	Ar+8%CO ₂	5,6,7 e 8	33
03	Ar+15%CO ₂	6,7,8 e 9	37
04	Ar+25%CO ₂	8,9,10 e 11	40
05	Ar+35%CO ₂	10,11,12 e 13	44

Com o intuito de tornar mais dinâmica à determinação da corrente de transição, a velocidade de alimentação (fonte em modo tensão constante) foi variada em quatro patamares conforme a tabela 5 acima. A Tabela 6 mostra os resultados obtidos de corrente e tensão de transição para esse experimento.

Tabela 6: Valores de correntes e tensão de transição médios monitorados durante o experimento (adaptado de Resende *et al.*, 2009)

Patamares	Valores monitorados	Ar+	Ar+	Ar+	Ar+	Ar+
		2%CO ₂	8%CO ₂	15%CO ₂	25%CO ₂	35%CO ₂
1	V _{med} [V]	29,5	30,2	34,6	37,5	41,2
	I _{med} [A]	212	207	240	275	321
2	V _{med} [V]	29,9	30,6	34,5	37,5	41,3
	I _{med} [A]	246	229	265	295	344
3	V _{med} [V]	29,8	30,7	34,6	37,5	41,3
	I _{med} [A]	261	252	281	316	358
4	V _{med} [V]	29,7	30,7	34,6	37,5	41,3
	I _{med} [A]	279	274	301	332	374

Nota: V_{med} = Tensão média; I_{med} = corrente média

Observou-se que o aumento do teor de CO₂ na mistura aumenta o valor da corrente de transição globular-*spray*, bem como aumenta as instabilidades do arco e da transferência metálica.

O aumento na velocidade de alimentação do arame para todas as misturas fez aumentar a corrente e a tensão de soldagem (Resende *et al.*, 2009).

O trabalho constatou que misturas binárias com teores de CO₂ de 35% estão num patamar claramente superior ao que é possível obter um modo de transferência *spray*.

É importante utilizar a mistura de gás correta, o material e o equipamento com potência e características que tolerem este tipo de transferência.

2.2.4.2 Teoria da instabilidade de *Pinch*

Abaixo da corrente de transição a transferência é dominada pela teoria do equilíbrio de forças estáticas, mas acima dessa corrente a transferência (em *spray*) pode ser explicada pela teoria da Instabilidade de *Pinch*. Acima de um valor de corrente de transição, com mais geração de calor, a ponta fundida do eletrodo torna-se cilíndrica. O rompimento desse cilindro em gotas sequenciais é devido à instabilidade da coluna do líquido, pois é iniciado a partir de constrições locais (Figura 29). Dois fatores determinam esse fenômeno, a tensão superficial, que tende a reconstruir a superfície cilíndrica, procurando uma menor área por volume e o outro fator, é o efeito *Pinch*, que após uma constrição acontecer tenta comprimi-la ainda mais. Se o efeito *Pinch* superar o efeito da tensão superficial, a coluna se rompe e uma pequena gota residual se forma. No caso dessa instabilidade as outras forças atuantes na poça (gravitacional, arraste e vaporização) passam a ser desprezíveis (Scotti e Ponomarev, 2014).

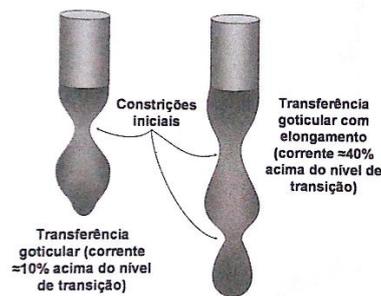


Figura 29: Ilustração do fenômeno de instabilidade da coluna de metal líquido conforme a Teoria da Instabilidade Pinch (Scotti e Ponomarev, 2014)

2.2.4.3 Determinação da corrente de transição

Em seu trabalho, Souza (2010) mostrou que através de oscilogramas é possível perceber a variação de corrente e tensão quando se varia a velocidade de alimentação. Observa-se na Figura 30 que inicialmente a curva apresenta certa variação de amplitude, uma grande ondulação, característica da transferência globular. Quando aumentamos a corrente essa amplitude começa a diminuir, e fica mais estável. Nesse ponto começa a operar a transferência por *spray* e dessa forma é possível obter a corrente de transição. O mesmo ocorre para o oscilograma da tensão, quando se inicia a transferência por *spray*, ocorre repentina diminuição da amplitude de variação da tensão (Figura 30) (Resende *et al.*, 2009).

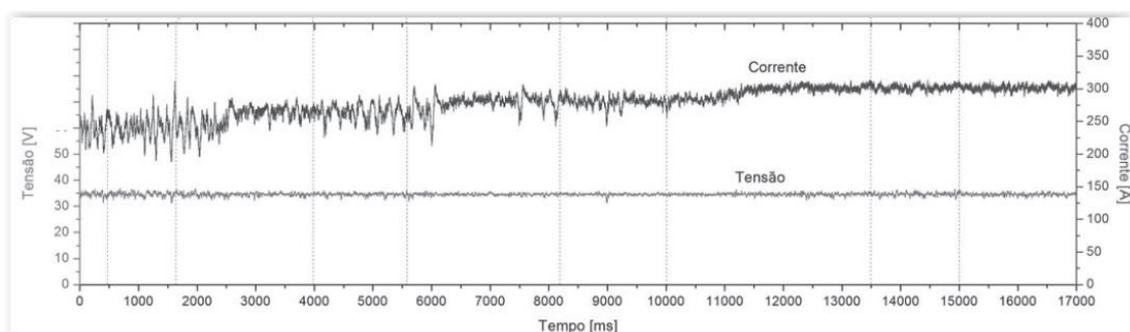


Figura 30: Oscilogramas utilizando o método de perfilografia para determinação da corrente de transição utilizando como gás de proteção Ar+15%CO₂ (Resende *et al.*, 2009)

O equipamento SAP V4 produz gráficos de tensão e corrente que mostram características importantes do processo. Nele, existem sensores capazes de medir

os sinais de corrente, tensão, vazão do gás e velocidade do arame (IMC Soldagem, 2005). Por meio desse equipamento é possível obter valores de tensão e corrente de transição quando ocorre a transição da transferência globular para *spray*.

O SAP possui uma série de funcionalidades, dentre elas podemos citar:

- 1- Leitura instantânea de valores médios de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás;
- 2- Avaliação da regularidade da transferência metálica através do comportamento dinâmico das variáveis de soldagem;
- 3- Produção de gráfico de corrente em função da tensão;
- 4- Visualização em tempo real das variáveis tensão e corrente, quantidade de arame e gás consumidos, tempo de soldagem e potência consumida.
- 5- Identificar, através dos gráficos de tensão e corrente em relação ao tempo, o modo de transferência metálica.

O programa permite também avaliar a estabilidade através dos sinais elétricos e da análise de oscilogramas e histogramas (Tatagiba, 2015). O desvio padrão da corrente e da tensão também são obtidos por esse programa.

2.2.5 Estabilidade do Processo

Segundo Scotti e Ponomarev (2008) a avaliação da estabilidade do processo pode ser feita através de níveis aceitáveis de respingos e fumos, ausência de descontinuidades, boa penetração e bom acabamento do cordão de solda. Para analisar essa estabilidade é importante a repetição de soldagens com os mesmos parâmetros e alguns ajustes se necessário.

As propriedades do gás de proteção e dos consumíveis utilizados também influenciam a estabilidade.

Para Resende (2007), na transferência globular e *spray*, a estabilidade pode ser avaliada pelo nível de respingos e pelo desvio padrão da corrente ou da tensão. A transferência em *spray* em si já é considerada bastante estável, isso porque tem baixa geração de respingos e desvio-padrão de corrente e tensão muito baixos. Já a transferência globular, devido ao tamanho superior das gotas apresenta maiores valores de desvios-padrão e considerável nível de respingos. A Figura 31 mostra o

oscilograma de tensão para as transferências globular, *spray* e *spray* com alongamento.

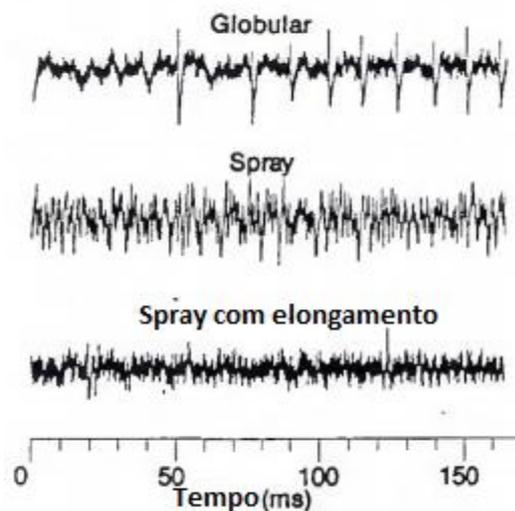


Figura 31: Oscilogramas de transferências globular, *spray* e *spray* com alongamento ou streaming. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O₂ (Jonson *et al.*, 1991)

Os sinais de corrente e tensão podem ser monitorados através de osciloscópios, que mostram as variações do processo que ocorrem na região do arco. Na transferência em *spray* pode-se usar o osciloscópio para fazer a leitura de tensão no momento exato que a gota se desprende. Durante esse desprendimento, pode haver perturbações em torno de 0,5V no sinal da tensão, isso pode acontecer devido ao aumento da resistência na região de estrição da gota (Resende, 2007).

A velocidade de alimentação do arame também pode causar instabilidade ao processo devido ao desgaste do tubo de contato, mas esse tipo de problema ocorre mais em soldagem que utilizam altas correntes (Quinn *et al.*, 1994).

2.3 GASES DE PROTEÇÃO

Os gases de proteção tem papel fundamental no processo GMAW, isso porque além de proteger a poça e a gota em transferência, eles têm a função de estabilizar o arco e influenciam na transferência metálica, na geometria do cordão,

nas propriedades mecânicas e nas características metalúrgicas do cordão de solda (Souza *et al.*, 2011).

2.3.1 Propriedades dos Gases

Scotti e Ponomarev (2008) admitem que o gás de proteção afeta a eficiência da proteção e a estabilidade do arco.

Os gases para soldagem apresentam como propriedades básicas o potencial de ionização, densidade e condutividade térmica.

Tabela 7: Propriedades dos gases de proteção mais utilizados (adaptado de Ponomarev e Scotti, 2008)

Gás	Símbolo	Peso Molecular	Densidade (g/L)	Potencial de Ionização (eV)
Argônio	Ar	39,95	1,784	15,7
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,01	1,978	14,4
Hélio	He	4,00	0,178	24,5
Hidrogênio	H ₂	2,016	0,090	13,5
Nitrogênio	N ₂	28,01	12,5	14,5
Oxigênio	O ₂	32,00	1,43	13,2

D: densidade do gás à 0°C e 1 atm (densidade do ar atmosférico= 1,2); PI: potencial de ionização; CT: condutividade térmica medida a 0°C e 1 atm.

2.3.1.1 Potencial de Ionização

Denomina-se potencial de ionização a energia necessária para a retirada de um elétron da sua camada de valência, ou seja, para tirar o último elétron do átomo, tornando-o um íon. É expressa em elétrons-volt. Segundo Souza *et al.*, (2011) o valor do potencial de ionização geralmente diminui com o aumento do peso molecular. A abertura e estabilidade do arco são influenciadas pelo potencial de ionização do gás de proteção. O argônio possui um baixo potencial e transforma átomos e íons facilmente o que facilita a abertura e estabilidade do arco, já o hélio

possui um elevado potencial que produz dificuldade na abertura e estabilização do arco. Para Menezes (2016) um mesmo comprimento de arco e mesma corrente, a tensão é maior para o gás com maior potencial de ionização.

2.3.1.2 Densidade

A densidade é representada pela massa do gás dividido pelo volume. Gases mais pesados que o ar como o oxigênio e o dióxido de carbono requer menor vazão para assegurar a proteção adequada para a poça de fusão do que gases mais leves como o hélio e hidrogênio (Souza *et al.*, 2011).

2.3.1.3 Condutividade Térmica

Tabela 8: Condutividade térmica dos gases utilizados em soldagem
(adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008)

Gás	Símbolo	CT (mW/m.K)
Argônio	Ar	16,4
Dióxido de Carbono	CO ₂	14,7
Hélio	He	142,6
Hidrogênio	H ₂	168,3
Nitrogênio	N ₂	24
Oxigênio	O ₂	24,2

A condutividade térmica é a capacidade de o gás conduzir calor. Juntamente com o potencial de ionização, essa propriedade determina a tensão de soldagem necessária para manter o arco aberto. Quanto maior a condutividade do gás, maior a tensão necessária para manter o arco. O hélio, que tem maior condutividade térmica, produz uma poça de fusão maior e mais distribuída, enquanto o argônio, que tem menor condutividade térmica, produz um perfil de cordão com maior penetração no centro (Scotti e Ponomarev, 2008).

Gases como He e CO₂ que possuem alta condutividade térmica, conduzem grande calor na direção radial, fazendo com que a coluna de plasma aumente de largura. O formato adquirido se assemelha a de um sino, fazendo com que a coluna

de plasma se reduza (Figura 32). Ocorre que o gradiente de temperatura entre a região central e periférica da coluna de plasma é pequeno, quando comparado a um gás de baixa condutividade térmica como, por exemplo, o Ar que forma um cordão de maior penetração e mais uniformemente distribuído (Lincoln Electric Company, 2015).

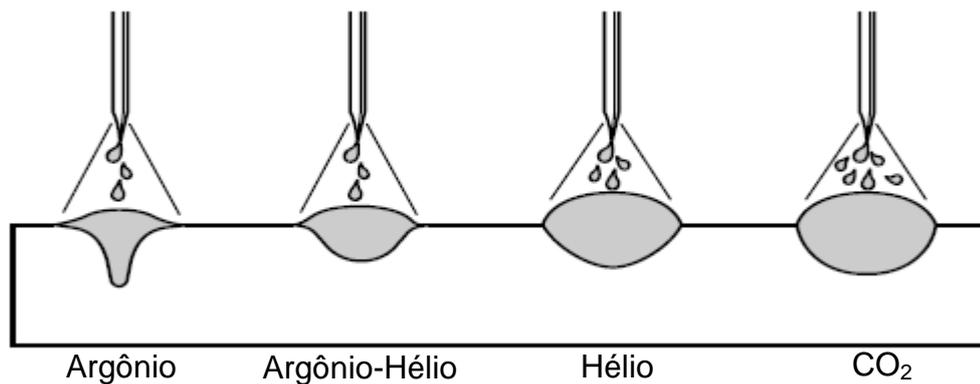


Figura 32: Aspectos das gotas e o padrão de penetração para diferentes gases de proteção (Lincoln Electric Company, 2015)

A Figura 33 faz comparação da utilização do gás de proteção com argônio e oxigênio, argônio e CO_2 e o CO_2 puro. Pode-se observar que a adição de CO_2 no argônio produz um cordão com boa penetração e mais largo quando comparado à adição de O_2 . Já o CO_2 puro produz um cordão mais largo e com menor penetração.

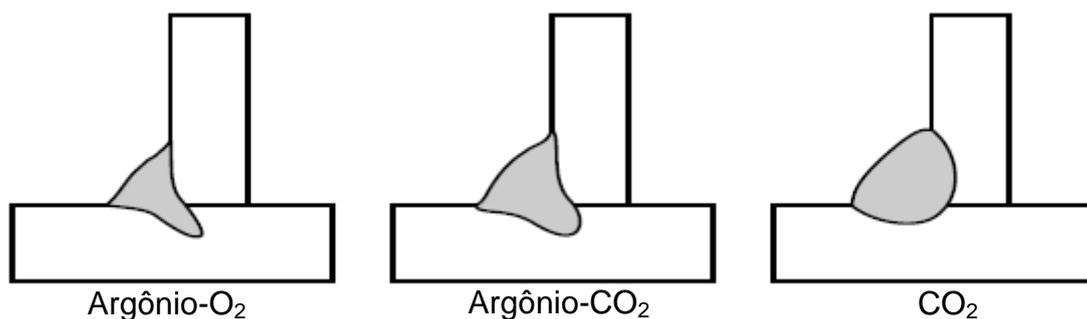


Figura 33: Os efeitos da adição de oxigênio e de CO_2 ao argônio e o CO_2 puro (Lincoln Electric Company, 2015)

A Figura 34 apresenta o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura de alguns gases. Os gases moleculares (H_2 , CO_2 , O_2) apresentam maior condutividade térmica do que os gases monoatômicos (Ar; He), na faixa de

temperatura de aproximadamente 3273 °C. O H₂ se destaca por apresentar maior entalpia na maioria das temperaturas (Tusek e Suban, 2000).

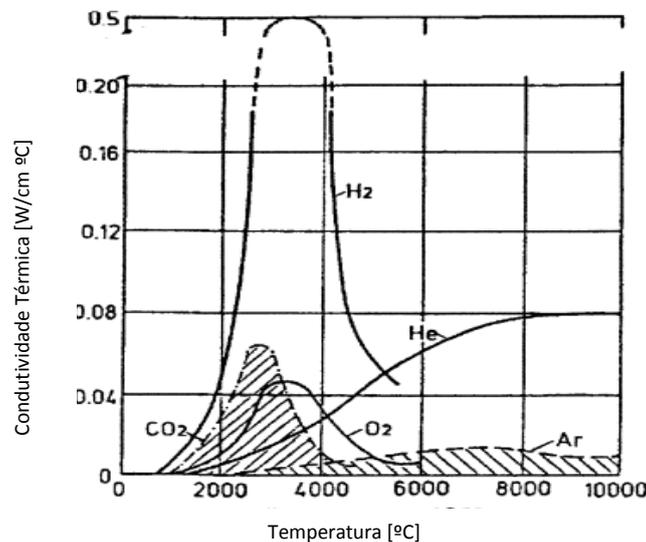


Figura 34: Variação da condutividade térmica em função da temperatura (Tusek e Suban, 2000)

2.3.1.4 Potencial de Oxidação

O potencial de oxidação é a capacidade do gás de proteção oxidar um metal durante o processo de soldagem.

No processo GMAW com proteção gasosa, filmes de óxidos podem ser formados na superfície do cátodo. São formados campos elétricos intensos na camada de óxido que absorve íons positivos, emite elétrons e destrói essa camada, o efeito da destruição pode desestabilizar o processo, pois quando essas camadas vão sendo consumidas o arco tende a buscar novas áreas de emissão de elétrons. Para que a camada seja regenerada é importante à adição de gás oxidante (O₂ ou CO₂) juntamente com a mistura de proteção (Modenesi, 2011).

De acordo com Teske (2006), o potencial de oxidação também influencia na fluidez da poça de fusão, ou seja, na facilidade do metal líquido escorrer sobre o metal de base, e também influencia no volume de fumos produzidos, na tenacidade e resistência do metal de solda, entre outros.

O potencial de oxidação não pode nem ser muito elevado, pois pode trazer instabilidade ao processo, mas também não pode ser muito baixo já que é necessário para a formação de óxidos na superfície do metal de solda e contribui

para o fenômeno de emissão catódica. No trabalho de Tatagiba (2015) foi utilizado o hidrogênio como gás de proteção na solda. O H₂ retarda a formação de óxido na superfície já que faz uma redução do potencial de oxidação do arco para um valor mais adequado, resultando em um cordão de solda limpo e de melhor aparência.

2.3.2 Propileno

O propileno 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).

Propileno é um hidrocarboneto com fórmula molecular C₃H₆, que pode ser utilizado como gás de proteção no processo GMAW. O seu diferencial está ligado justamente a sua fórmula molecular. 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 também apresenta uma dupla ligação na sua molécula e na presença de O₂ sofre o processo semelhante à combustão liberando alta energia para o arco elétrico num processo exotérmico (Figura 35).

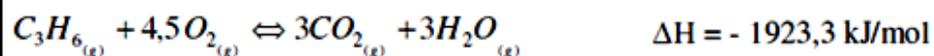
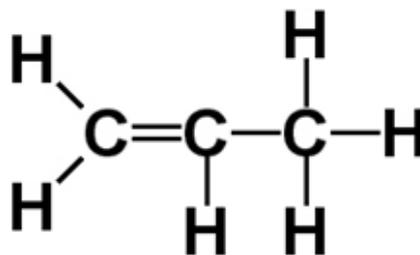


Figura 35: Molécula e energia de dissociação do propileno (adaptado de Ramalho, 2008)

Além de gás de proteção, o propileno é usado como combustível em vários processos industriais, devido ao fato de ter uma chama mais quente que a do propano (por produzir menor massa após combustão).

O propileno durante sua dissociação libera o dobro de hidrogênio para um carbono. Isso é importante porque 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.

No trabalho de Ribeiro (2016) foi possível à adição de até 0,4% C_3H_6 às misturas convencionais de Ar+12% CO_2 e Ar+25% CO_2 , resultando em soldas com bom aspecto visual, adequadas características geométricas e isentas de descontinuidades.

2.3.3 Fatores Econômicos

É sabido que os processos de soldagem são utilizados em massa nas indústrias automobilísticas, petróleo e gás, naval, entre outros, por isso a competitividade das empresas desses ramos se torna crucial para a sobrevivência. A estratégia dessas empresas é buscar cada vez mais utilizar operações e consumíveis que podem contribuir para redução dos custos finais do processo, observando todos os aspectos relevantes. Incluem-se nesses processos, a soldagem em si, as quais exigem considerável quantidade de investimento.

É importante que haja uma análise criteriosa dos custos de produção, principalmente quanto aos gases utilizados para proteção da poça, pois os ganhos com produtividade com misturas mais baratas podem produzir uma solda de baixa qualidade que vai interferir em todo o processo da peça. O CO_2 , por exemplo, é visto como um gás de baixo custo, mas seu uso puro muitas vezes reduz a estabilidade da solda, devido a isso na maioria dos processos o CO_2 é utilizado em misturas com Argônio, pois pode apresentar resultados satisfatórios em termos de requisitos de regularidade na transferência metálica e geração de respingos.

O interessante é que em relação ao processo todo, o gás de proteção é o que menos gera gastos a soldagem, como pode ser visto na Figura 36 para um aço

carbono. Por isso, investimentos em misturas mais eficientes (mesmo sendo de maior custo), podem resultar em aumento da produtividade, impactando significativamente no custo geral da produção (Silva, 2005).

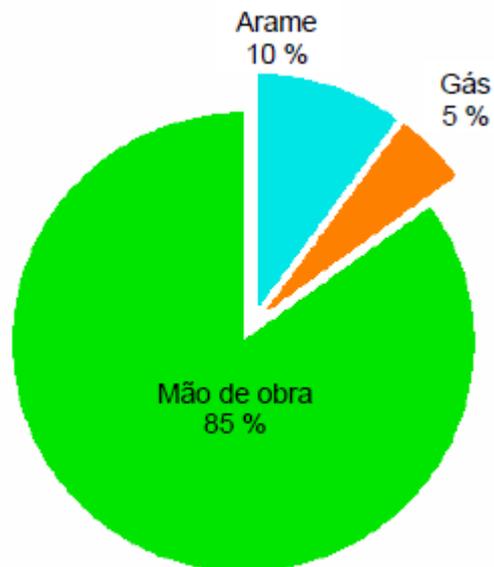


Figura 36: Custo geral típico da solda no processo produtivo, para aço comum (Silva, 2005)

A utilização de gases combustíveis como o propileno contribui com diversas vantagens ao processo como, por exemplo, a temperatura do arco se torna bem maior quando comparado aos gases convencionais.

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e a metodologia empregada para a análise comparativa das soldas realizadas com mistura convencional de proteção (Ar+12%CO₂) e com mistura adicionada de propileno (Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆), utilizando o processo GMAW por transferência em *spray*.

3.1 MATERIAIS

- Chapas de aço carbono SAE 1020 (Norma AWS A5.18). A quantidade e dimensões das chapas utilizadas em cada etapa estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Quantidade e dimensões de chapas utilizadas em cada etapa

Etapa	Quantidade de chapas	Dimensões das chapas (Comprimento x Largura x Espessura)
Ajuste Inicial	30	200 mm x 75 mm x 15 mm
Etapa I	2	900 mm x 180 mm x 15 mm
Etapa II e III*	10	200 mm x 50 mm x 15 mm

As chapas soldadas na etapa II foram analisadas na etapa III.

- Arame eletrodo de Ø1,2 mm, classificação ER70S-6;
- Lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh;
- Pastas abrasivas de alumina de 1, 0,3 e 0,05 µm;
- Nital (ácido nítrico + álcool etílico) 2% e 5%;
- Verniz;
- Líquido penetrante: Penetrante VP-30 e Revelador não aquoso D-70;
- Cilindros de Gases

Os gases de proteção, inclusive as misturas com adição de propileno foram fornecidos pela empresa White Martins Gases Ltda. A composição e nomenclatura desses gases estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10: Composição e nomenclatura dos gases

Composição do gás	Nomenclatura
88% de Argônio + 12% de CO ₂	Ar+12%CO ₂
87,6% de Argônio + 12% de CO ₂ + 0,4% de Propileno	Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆

3.2 EQUIPAMENTOS

Os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Máquina de solda SMASHWELD 316. Fabricante: ESAB (FAETEC);
- Trator A2T MULTITRAC. Fabricante: ESAB (FAETEC);
- Mesa de soldagem com suporte para alinhamento das chapas de teste;
- Microdurômetro HMV-2. Fabricante: Shimadzu do Brasil (UENF);
- Aparelho de corte Mesotom da Struers-Panambra (UENF);
- Lixadeira semi-automática Struers-Panambra DP-10 (UENF);
- Microscópio Olympus GX41 (UENF);
- Balança de resolução de 0,01g (FAETEC);
- Escova rotativa e esmerilhadeira (FAETEC);
- Paquímetro. Resolução: 0,05mm (UENF).
- Programa de aquisição de dados SAPV4 (Figura 37). Fabricante: IMC Soldagem (LAMAV/UENF)

Os dados foram coletados a cada 1,0 s e o tempo total de cada solda dependeu do tamanho da chapa utilizada.



Figura 37: Sistema de aquisição de dados (IMC Soldagem, 2014)

3.3 METODOLOGIA

As soldas foram realizadas tanto com mistura convencional de proteção (Ar+12%CO₂) como com mistura convencional acrescida de propileno (Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆).

A metodologia empregada foi dividida em três etapas. A primeira teve como objetivo encontrar a transição Globular-Spray e determinar a média da corrente de transição.

A segunda etapa teve como objetivo avaliar a estabilidade da transferência por *spray* e a aparência dos cordões de solda.

Na etapa III foi realizado um estudo da influência da adição de propileno na atmosfera de proteção, no que se refere às características do metal de solda. Foi feita análise geométrica, microestrutural e medição da dureza Vickers do metal de solda.

A taxa de deposição foi calculada com o intuito de verificar se houve diferenças na quantidade de metal depositado para as duas misturas utilizadas.

3.3.1 Ajustes Iniciais

A soldagem das chapas foram realizadas no laboratório de soldagem da Fundação de Apoio à Escola Técnica (FAETEC).

Para todos os experimentos foram empregados chapas de aço carbono SAE 1020, arame eletrodo ER70S-6 de diâmetro 1,2 mm e posição de soldagem plana.

Antes da realização da etapa I, foi necessário um ajuste inicial para obter os parâmetros de soldagem adequados para este trabalho que utiliza principalmente o modo de transferência por *spray*. Diz respeito aos parâmetros que foram mantidos fixos durante os experimentos, como a vazão do gás, a DBCP e a velocidade de soldagem. Para realizar esses ajustes foi utilizado tensões de 28 a 33 V e a velocidade de alimentação de 5 a 8 m/min.

Tendo como base o trabalho de Ribeiro (2016), que também utilizou os gases aqui trabalhados, quais sejam, Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆, foi empregado a vazão de 15 l/min, a DBCP de 15 mm e a velocidade de soldagem de 300 mm/min. Porém, Ribeiro trabalhou com transferência por curto-circuito, enquanto este estudo foi realizado empregando a transferência por *spray*.

Sendo assim, ao utilizar vazão do gás, a DBCP e velocidade de soldagem próximas às acima indicadas, foi observado que:

- a vazão do gás de 15 l/min foi considerada baixa, contribuindo para a formação de poros no cordão de solda, conforme apresentado na Figura 38a;
- a DBCP em 15 mm também não se mostrou adequada, fazendo com que o bico de contato fundisse devido ao elevado calor na região do arco elétrico, resultante do fato de se utilizar correntes mais elevadas. Foi preciso aumentar a DBCP.
- A velocidade de soldagem de 300 mm/min proporcionou cordões com largura excessiva, resultando em cordões com geometrias inadequadas, conforme mostrado na Figura 38b. Foi necessário aumentar a velocidade de soldagem.

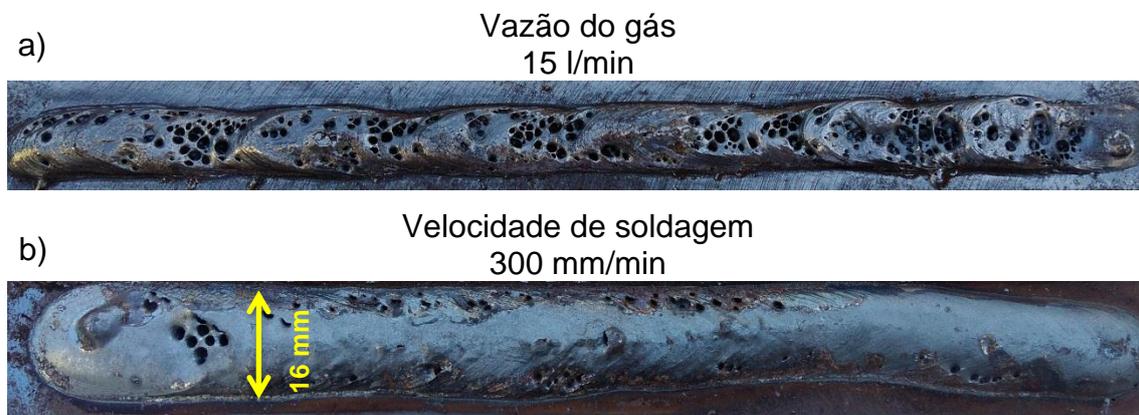


Figura 38: a) Cordão com baixa vazão de gás; b) cordão com baixa velocidade de soldagem

Desta forma, houve necessidade de um novo ajuste destes parâmetros para se adequar à transferência por *spray*. Esses ajustes estão indicados na Tabela 11 e foram fixados tanto para as soldas da etapa I como para aquelas da etapa II.

Tabela 11: Parâmetros fixos durante soldas

Parâmetros	
DBCP	23 mm
Vazão do gás	18 l/min
Velocidade de soldagem	450 mm/min

3.3.2 Etapa I: Análise da Transição Globular-*Spray*

Nesta etapa foram realizados testes com as duas misturas estudadas (Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆) no processo GMAW, a fim de se analisar a transição da transferência globular para *spray* e obter a média da corrente de transição.

3.3.2.1 Soldagem das chapas

As soldas foram do tipo cordão sobre a chapa e os parâmetros mostrados na Tabela 11 foram fixos para todos os testes realizados.

Seguindo a metodologia empregada por Resende *et al.*, (2009), para esta etapa foram definidas três velocidades de alimentação do arame: 6, 7 e 8 m/min, e para todas as velocidades, a tensão foi sendo incrementada de 28 a 32 V em cada cordão de solda. O equipamento SAP captou os valores de tensão, corrente e velocidade de alimentação.

Os testes foram replicados três vezes para cada velocidade de alimentação.

3.3.2.2 Avaliação da Etapa I

Com os dados captados no item 3.3.2.1 foram gerados gráficos de corrente versus tempo e tensão versus tempo, fornecidos pelo software do equipamento SAP. A transição Globular-*Spray* foi observada diretamente nesses gráficos e pelo índice DPPC.

Esse índice é fornecido pelo SAP e seu cálculo foi realizado quando a transferência ainda era globular, antes da transição e após a transição quando ela entra no modo *spray*. É esperado que o valor seja maior na transferência globular e caia bruscamente quando na transferência em *spray*.

Pelo gráfico de corrente e tensão versus tempo é possível observar exatamente o momento da transição, porém seguindo a metodologia empregada por Scotti e Ponomarev (2014), existe uma faixa de corrente que poderia acontecer à transição do Globular-*Spray*. Para isso, foi encontrado um valor mínimo e um valor máximo de corrente para todos os testes. O valor mínimo de corrente foi obtido um

segundo antes do momento exato da transição e o valor máximo um segundo após a transição. Depois foi calculada a média desses valores que corresponderam à média da corrente de transição.

Com base nas análises acima, foi estipulada a média de corrente de transição globular-*spray* para todos os testes com as três velocidades de alimentação estipuladas.

Por meio do DPPC calculado após a transição e do ruído causado durante a soldagem, foi escolhido uma tensão e uma velocidade de alimentação para as soldas da etapa II, que proporcionassem a melhor estabilidade na transferência em *spray*.

3.3.3 Etapa II: Análise da estabilidade da transferência por *spray* e avaliação do cordão de solda

O objetivo desta etapa foi avaliar a estabilidade da transferência *spray*, bem como comparar os valores médios de corrente para as duas misturas trabalhadas (Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆). A estabilidade foi verificada por meio da qualidade dos cordões de solda quanto à presença de porosidade e descontinuidades e pelo índice DPPC.

3.3.3.1 Soldagem das chapas

A soldagem das chapas da etapa II foram realizadas já na transferência em *spray*, pelo processo GMAW, na posição plana, sobre a chapa e manteve os parâmetros da Tabela 11.

Foi estipulada uma velocidade de alimentação e uma tensão para a soldagem. Os valores foram de 8 m/min e 31 V, respectivamente. Esses dois parâmetros foram escolhidos baseados na avaliação da etapa I conforme descrito no item 3.3.2.2.

Para o estudo da estabilidade foi realizado avaliação dos cordões de solda e calculo do índice DPPC para as duas mistura de gases utilizadas.

3.3.3.2 Inspeção Visual e Líquido Penetrante

As análises dos cordões de solda foram realizadas através da inspeção visual e do ensaio de líquido penetrante. A inspeção visual permitiu observar se houve surgimento de descontinuidades grosseiras e presença de poros (Tatagiba, 2015). O ensaio de inspeção visual segue as recomendações do procedimento PR-050 (Abendi, 2011).

O ensaio com líquido penetrante permite observar a presença de pequenas descontinuidades superficiais que poderiam não ser vistas a olho nu. Esse ensaio segue as especificações do procedimento PR-001 (Abendi, 2015). O ensaio compreendeu a limpeza, aplicação do líquido penetrante em *spray*, limpeza da superfície, aplicação do revelador por *spray* e revelação.

3.3.4 Etapa III: Análise do metal de solda

O objetivo da etapa III foi avaliar as soldas realizadas na etapa II por meio da geometria do cordão de solda, do índice de convexidade e da penetração, da microestrutura e pela dureza Vickers.

A taxa de deposição foi calculada com o intuito de comparar a quantidade de metal depositado para cada mistura de gases utilizada.

3.3.4.1 Avaliação geométrica da zona fundida, Índice de convexidade (IC) e taxa de deposição.

Para a macrografia foram selecionadas duas chapas soldadas de cada mistura. A seleção baseou nas chapas que apresentarem valores próximos de corrente. Foi realizado corte transversal ao cordão de solda e as superfícies preparadas com lixamento (100, 220, 320, 400 e 600 mesh). Posteriormente a superfície foi atacada com nital 5%. As macrografias são importantes para verificar o aspecto da seção transversal da junta soldada bem como permite encontrar o Índice de convexidade (IC), que é a relação entre reforço (r) e largura do cordão de solda como mostrado na equação 4.

$$IC = \frac{r_f}{l_a} \times (100\%) \quad (4)$$

onde:

r_f é o reforço do cordão de solda em (mm).

l_a é a largura do cordão de solda em (mm).

Os valores de R, L e P foram medidos diretamente nas macrografias com auxílio de um paquímetro conforme mostrado na Figura 39.

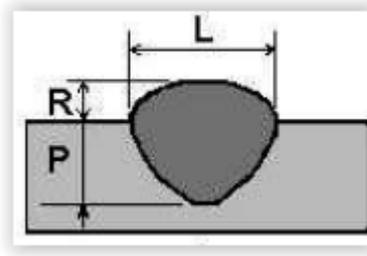


Figura 39: Parâmetros geométricos da solda (Silva e Scotti, 2002)

3.3.4.2 Análise Microestrutural

Para a análise metalográfica foi retirada uma seção transversal do centro de uma das chapas de aço de cada mistura. Essas seções foram lixadas nas granulometrias de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh e posteriormente polidas em pastas abrasivas de alumina de 1, 0,3 e 0,05 μm . O ataque químico foi realizado com uma solução de Nital com concentração de 2%.

Para a identificação dos microconstituintes foram realizadas fotografias no microscópio Olympus GX41 da área do metal de solda depositado. A classificação dos microconstituintes foi desenvolvida pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW), e está apresentada na Figura 40.

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

Figura 40: Microconstituintes do metal de solda segundo o sistema IIW (Adaptado de Modenesi, 2004)

3.3.4.3 Dureza Vickers

A dureza Vickers teve como objetivo verificar se houve alterações de dureza ao longo do metal de solda.

A medição da dureza foi realizada em um microdurômetro Shimadzu HMV-2T calibrado para uma carga de 2 kgf. Um penetrador de diamante com formato de pirâmide de base quadrada pressionou a carga por um tempo de 10 segundos em 15 pontos aleatórios na região da zona fundida.

Para o cálculo da dureza Vickers deve-se utilizar a equação 5

$$HV \left(\frac{Kg}{mm^2} \right) = \frac{1854xF}{d^2} \quad (5)$$

onde:

F é carga aplicada;

d é a diagonal da impressão regular quadrática.

Para cálculo da taxa de deposição as chapas foram pesadas antes e depois da soldagem. A quantidade de metal depositado foi obtida pela diferença dos pesos da chapa antes e após as soldas. A taxa de deposição (Td) pôde ser calculada de acordo com a equação 6, que é a razão entre a quantidade de metal depositado (Kg) e o tempo gasto soldando a chapa (h). O resultado é expresso em $\frac{Kg}{h}$.

$$Td = \frac{\text{Quantidade de Metal Depositado}}{\text{tempo gasto soldando a chapa}} \quad (6)$$

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussão do estudo realizado na soldagem de chapas utilizando as duas atmosferas de proteção (Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆), no modo de transferência em *spray*, no processo GMAW. Durante as soldagens foram captados sinais com o equipamento SAP.

A estabilidade da transferência é observada pela análise dos cordões de solda e por meio do índice DPPC fornecido pelo SAP.

4.2 Etapa I: Análise da Transição Globular-*Spray*

4.2.1 Soldagem das chapas

Foram selecionadas três velocidades de alimentação e durante cada solda a tensão foi sendo incrementada conforme descrito no item 3.3.2.1.

O equipamento SAP foi utilizado na soldagem para captar os sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação. Após obtenção desses dados, foram gerados os gráficos de tensão versus tempo de solda e corrente versus tempo de solda, como aqueles apresentados nas Figuras 41 e 42. Por meio desses gráficos foi possível observar a transição Globular-*Spray*.

As Figuras 41 e 42 representam alguns dos gráficos de tensão versus tempo de solda e corrente versus tempo de solda para as três velocidades de alimentação e para as duas misturas de proteção a) Ar+12%CO₂ e b) Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ no momento da transição.

Velocidade de alimentação

Ar+12%CO₂

Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

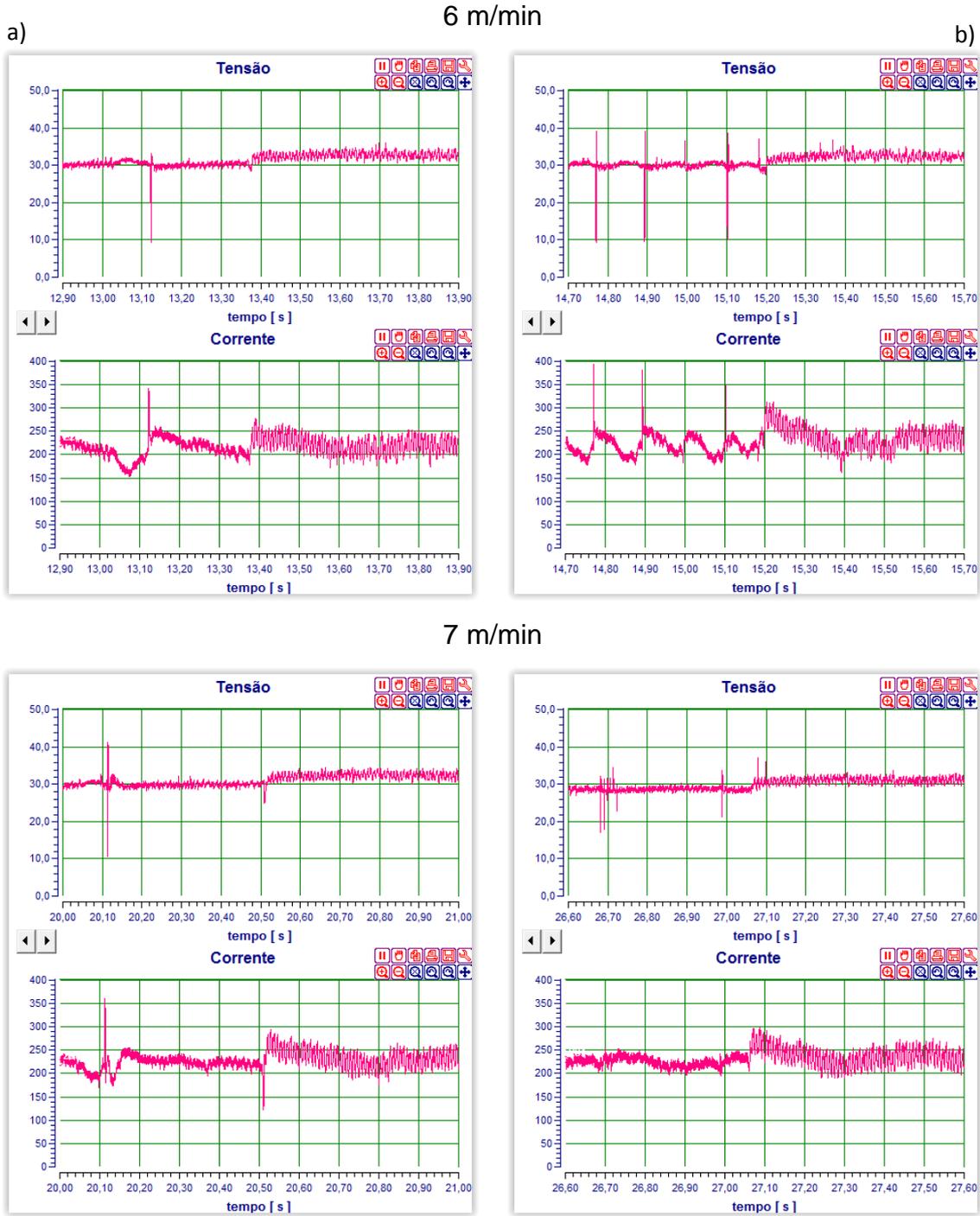


Figura 41: Gráficos de tensão e corrente quando ocorre a transição para as duas velocidades de alimentação (6 e 7 m/min). a) Ar+12%CO₂ b) Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

8 m/min

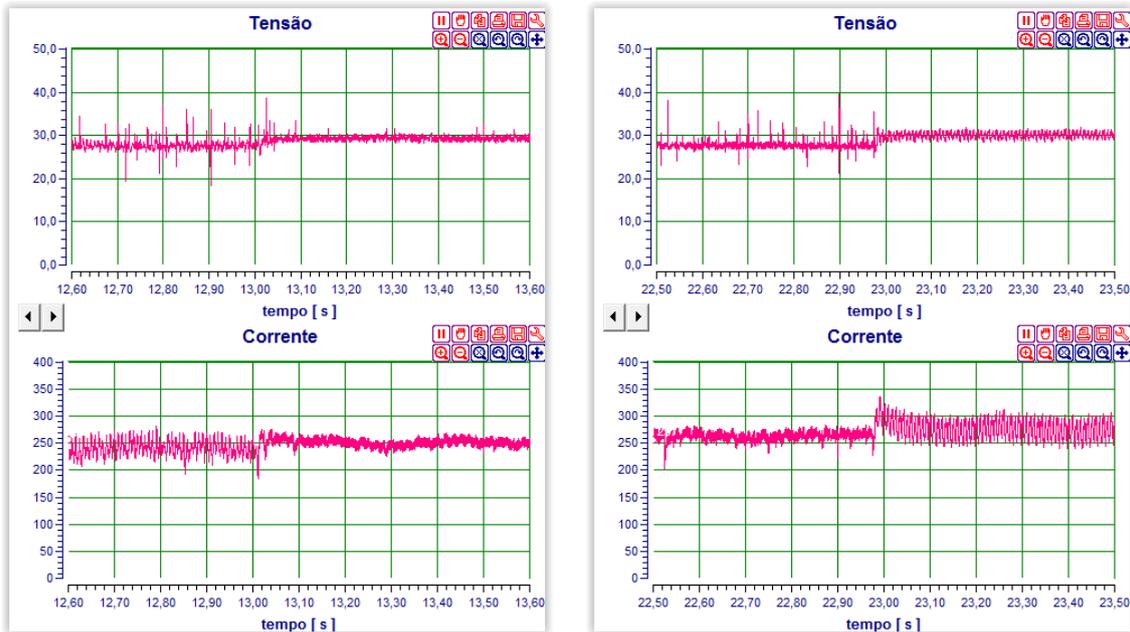


Figura 42: Gráficos de tensão e corrente quando ocorre a transição para 8 m/min de velocidade de alimentação. a) Ar+12%CO₂ b) Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

As Figuras 41 e 42 mostram os gráficos de tensão e corrente versus tempo de solda. É possível observar que em certo momento quando a tensão sofre um incremento, os picos de grande amplitude e instáveis mudam para picos regulares e estáveis. Esse comportamento é observado quando a transferência passa do globular para o *spray*, ou seja, quando ocorre a transição.

Foi observado que nas velocidades de 6 e 7 m/min a transição ocorreu de forma menos estável. Mesmo após entrar no modo *spray* os picos apresentam instabilidade, o que não ocorreu para a velocidade de 8 m/min, que apresentou picos regulares após a transição.

O índice DPPC foi calculado no modo globular, antes da transição e no modo de transferência em *spray*, após a transição.

A Tabela 12 apresenta os dados referentes aos testes com a mistura Ar+12%CO₂. Esses dados foram obtidos para as nove soldas realizadas para essa mistura e os gráficos de tensão e corrente versus tempo de cada teste realizado está apresentado no apêndice I, Tabelas 17 a 21.

Tabela 12: Velocidade de alimentação, média da tensão de transição, média da corrente de transição e DPPC antes e após a transição para a mistura Ar+12%CO₂

Velocidade de alimentação (m/min)	Média tensão de transição (V)	Média corrente de transição (A)	DPPC Globular (A)	DPPC Spray (A)
6	31,8	220,5	33,6	12,0
	31,3	214,5	29,3	15,9
	31,8	216,5	40,2	12,1
7	29,2	228,5	33,9	9,7
	28,9	223,5	31,6	7,8
	29,0	225,5	29,9	9,2
8	28,4	249,0	32,9	4,2
	28,7	241,0	31,8	4,7
	28,8	248,5	23,9	4,1

A Tabela 12 mostra que foi necessário uma tensão maior para que ocorresse a transição na velocidade de 6 m/min, diferentemente das velocidades de alimentação de 7 e 8 m/min. As médias de tensão e corrente mostradas na Tabela 12, indicam que aumentando a velocidade de alimentação do arame, aumenta a corrente e o valor de tensão diminui.

Segundo Mick (2012), os valores de corrente e tensão são inversamente proporcionais, ou seja, diminuindo a velocidade de alimentação, é esperado menor valor de corrente e maior valor de tensão, exatamente o observado nesse trabalho.

A análise do DPPC na Tabela 12 mostra que antes da transição o DPPC é elevado, por ter muitos picos irregulares, e após a transição, já na transferência por *spray*, o valor deve ser baixo, característico de transferência estável.

A Tabela 12 também mostra que nas velocidades de alimentação de 6 e 7 m/min, os valores de DPPC no modo *spray* foram mais elevados quando comparados aos resultados com 8 m/min. Esse comportamento confirma a análise feita nas Figuras 41 e 42. Mesmo após a transição, para essas duas velocidades, os picos de tensão e corrente são irregulares, característicos de uma solda menos estável.

A Tabela 13 apresenta os dados obtidos para os testes realizados com a mistura de proteção Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. Também foram realizados nove testes

para essa mistura e os gráficos de tensão e corrente versus tempo de solda de todos os testes estão apresentados no apêndice I, Tabelas 22 a 26.

Tabela 13: Velocidade de alimentação, média da tensão de transição, média da corrente de transição e DPPC antes e após a transição para a mistura $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$

Velocidade de alimentação (m/min)	Média tensão de transição (V)	Média corrente de transição (A)	DPPC Globular (A)	DPPC Spray (A)
6	31,7	230,0	45,0	15,0
	32,1	225,5	46,4	14,7
	31,2	229,5	48,9	18,3
7	30,4	218,0	65,0	10,1
	30,6	233,5	61,2	10,6
	30,8	230,5	69,5	18,1
8	27,3	250,5	37,5	4,8
	27,8	245,5	34,3	6,0
	27,8	244,5	35,5	5,3

A Tabela 13 mostra que o comportamento observado na soldagem realizada com a mistura do gás com propileno foi muito similar à soldagem realizada com a mistura convencional, assim como a média das correntes de transição. Nos dois casos necessitou-se de uma tensão maior para obter a transição na soldagem com 6 m/min de velocidade de alimentação.

Foi observado também que nas soldas realizadas com $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$, o índice DPPC apresentou valores mais elevados tanto antes como após a transição. Apesar da pequena diferença de valores comparado à mistura $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2$, é possível que a adição de propileno no gás de proteção tenha interferido na estabilidade.

As Figuras 41 e 42 confirmam o observado nas Tabelas 12 e 13. Os valores das médias de corrente de transição para as duas misturas trabalhadas foram similares e maiores para maiores velocidades de alimentação.

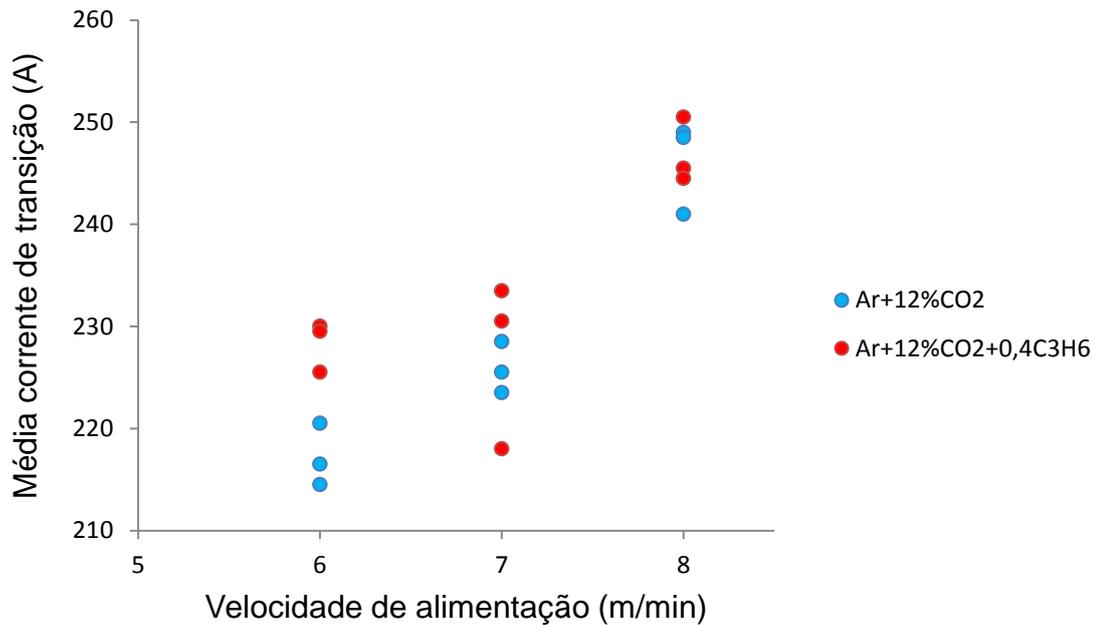


Figura 43: Média de correntes de transição versus velocidade de alimentação para as duas misturas trabalhadas

A média de corrente de transição encontrada para as duas misturas de proteção estão de acordo com os valores da literatura (Resende *et al.*, 2009 e Scotti e Ponomarev, 2014).

Resende *et al.*, (2009), utilizando o gás Ar+15%CO₂, obteve para 6, 7 e 8 m/min de velocidade de alimentação do arame, correntes médias de transição de 240 A, 265 A e 281 A, respectivamente.

Scotti e Ponomarev (2014) também utilizando o gás Ar+15%CO₂ obteve uma faixa de corrente de transição variando de 250 a 270 A. Entretanto, deve ser ressaltado que o aumento na quantidade de CO₂ contribui para um incremento na corrente de transição (Scotti e Ponomarev, 2014), então é esperado correntes maiores para o gás com 15% de CO₂.

Considerações finais da etapa I:

- Foi obtida a média das correntes de transição para as duas misturas de proteção;
- Os valores de DPPC após a transição, na transferência em *spray*, para a mistura com adição de propileno foram maiores comparados às soldas realizadas com a mistura convencional, resultando em menor estabilidade da transferência nas soldas que utilizaram o gás combustível em sua mistura;

- Foi constatado que o melhor parâmetro para a análise da estabilidade das soldas da etapa II seria 8 m/min de velocidade de alimentação e tensão de 31 V, além daquelas fixadas na Tabela 11.

As Tabelas 12 e 13 mostram que os valores de DPPC após a transição são menores para a velocidade de alimentação de 8 m/min e o ruído gerado durante a soldagem ficou silencioso na tensão de 31 V.

4.3 Etapa II: Análise da estabilidade da transferência por *spray* e avaliação do cordão de solda

O objetivo desta etapa foi realizar uma comparação na estabilidade da transferência por *spray* e nos valores médios de corrente, para as soldas que utilizaram as misturas Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ como misturas de proteção. Essa estabilidade foi medida por meio da avaliação do cordão, no que tange a presença de defeitos na região da solda. O índice DPPC foi captado e também utilizado como critério para avaliar a estabilidade.

4.3.1 Soldagem das chapas

As chapas foram soldadas com os mesmos parâmetros estabelecidos na Tabela 11 e o valor de tensão e velocidade de alimentação foram obtidos por meio da análise da etapa I.

Levando em consideração os parâmetros acima descritos, foi escolhido para a soldagem da etapa II a velocidade de alimentação de 8 m/min e tensão de 31 V.

No momento da soldagem, os valores de corrente foram captados pelo equipamento SAP e em seguida foi gerado a média dos valores de corrente durante cada solda. A média de corrente para as duas misturas de proteção estão indicadas na Tabela 14.

Tabela 14: Valores médios de corrente calculadas no programa SAP para as chapas soldadas com Ar+12%CO₂ e com Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

Ar+12%CO ₂		Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)
1	267,7	1	260,9
2	266,3	2	262,0
3	265,2	3	257,7
4	261,5	4	260,1
5	269,7	5	268,8

Pela Tabela 14 pode ser observado que mantido o valor da tensão em 31 V, os valores médios de corrente para as duas misturas são próximos. Esses valores eram esperados baseados nos resultados da etapa I. Foi observada semelhança nas correntes de transição para as duas misturas.

4.3.2 Inspeção Visual e Líquido Penetrante

As Figuras 44 a 53 mostram os cordões de solda antes da limpeza, após a limpeza com escova rotativa e durante o ensaio com líquido penetrante.

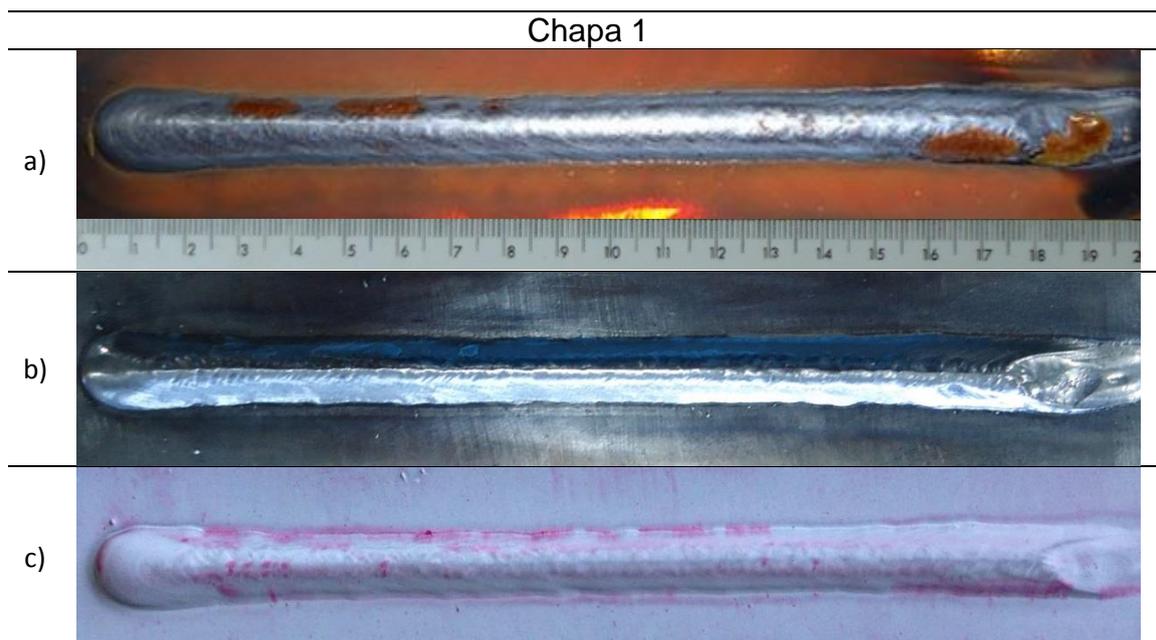


Figura 44: Chapa 1: Ar+12%CO₂. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

Chapa 2

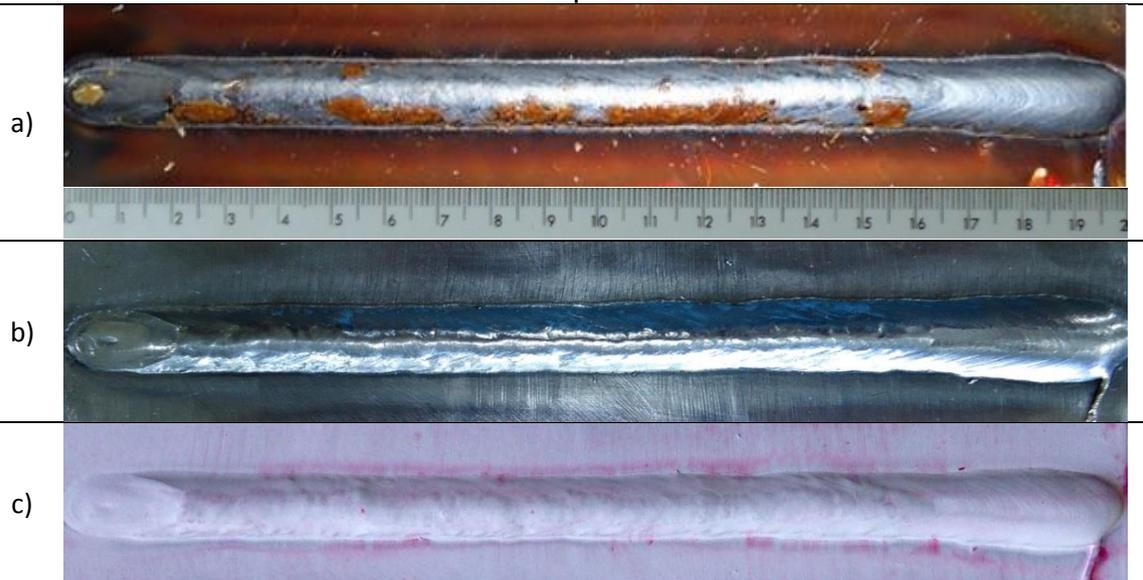


Figura 45: Chapa 2: Ar+12%CO₂. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

Chapa 3

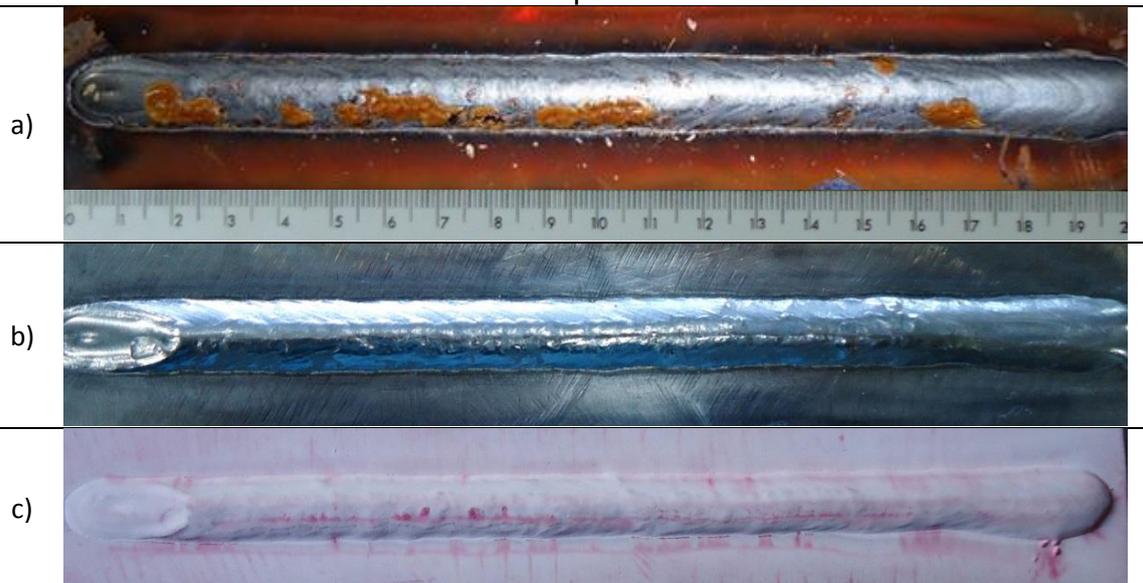


Figura 46: Chapa 3: Ar+12%CO₂. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

Chapa 4

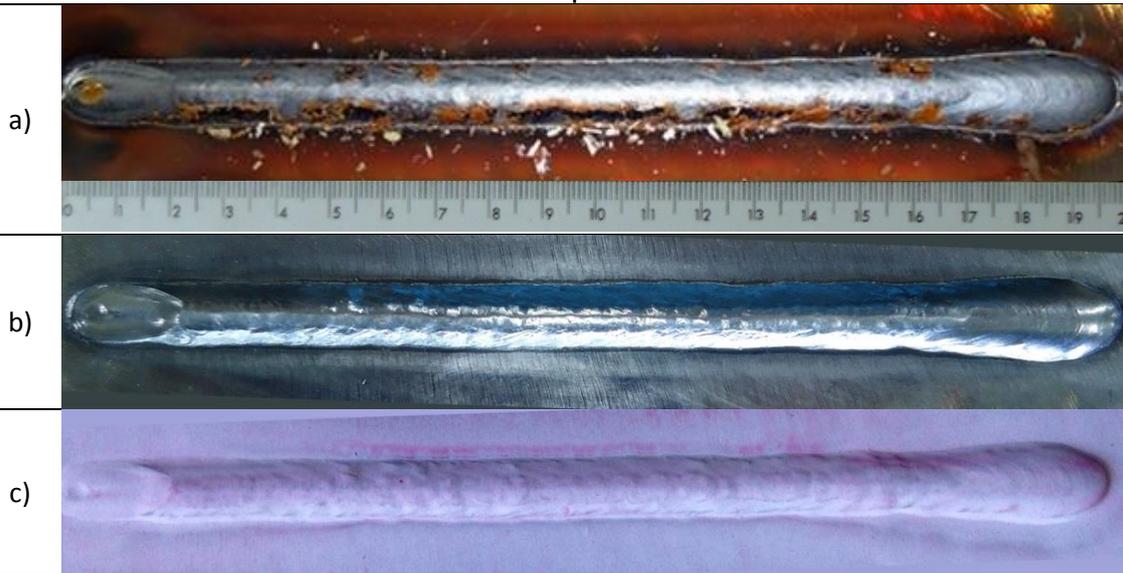


Figura 47: Chapa 4: Ar+12%CO₂. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

Chapa 5

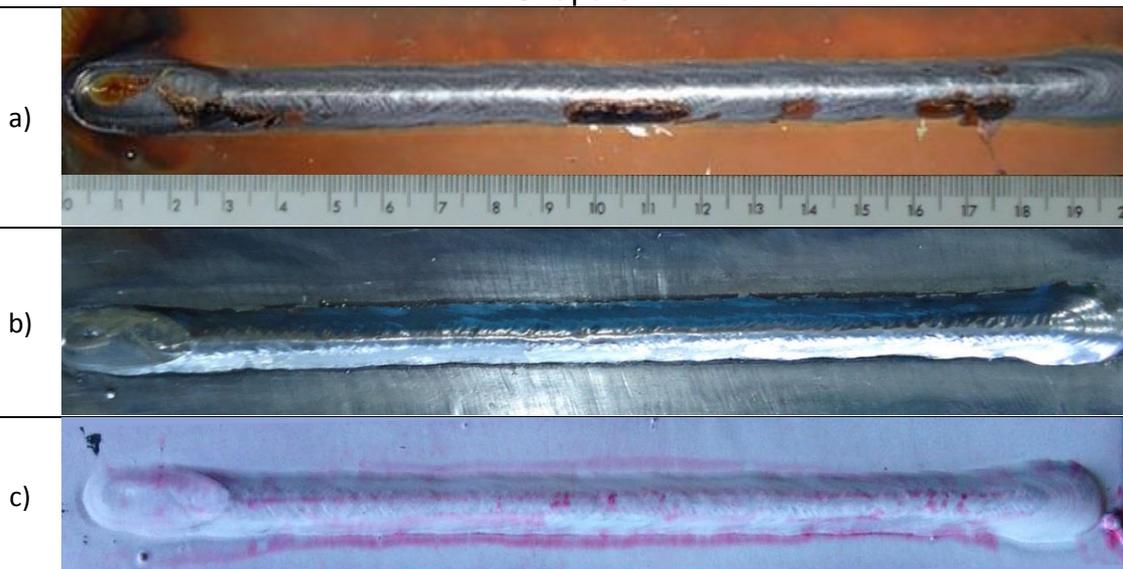


Figura 48: Chapa 5: Ar+12%CO₂. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

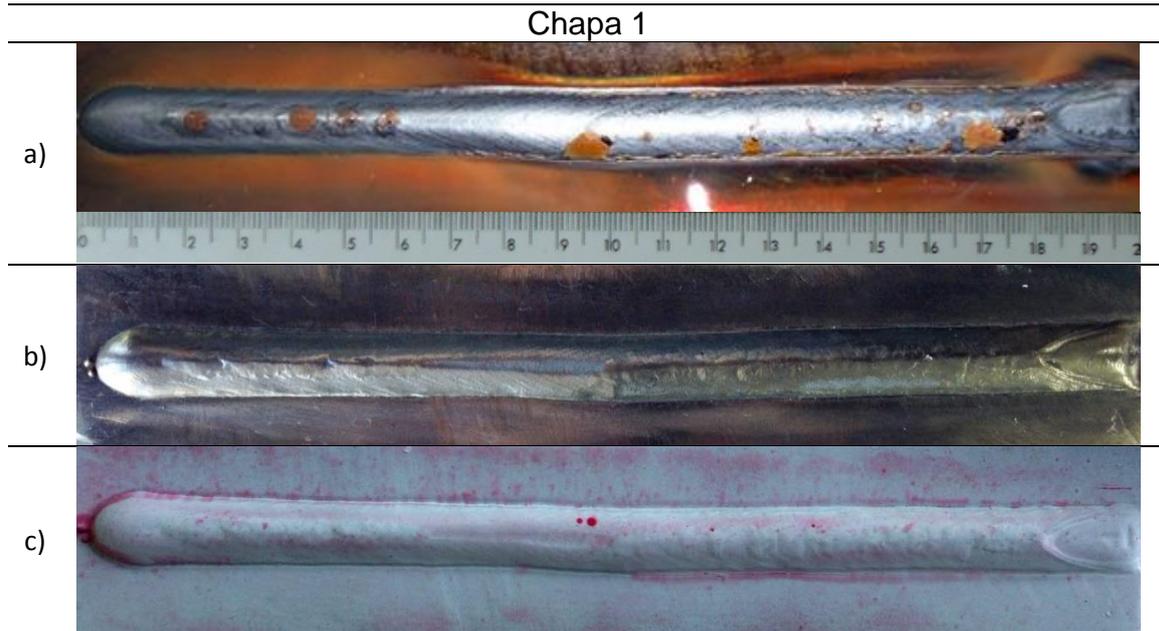


Figura 49: Chapa 1: Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

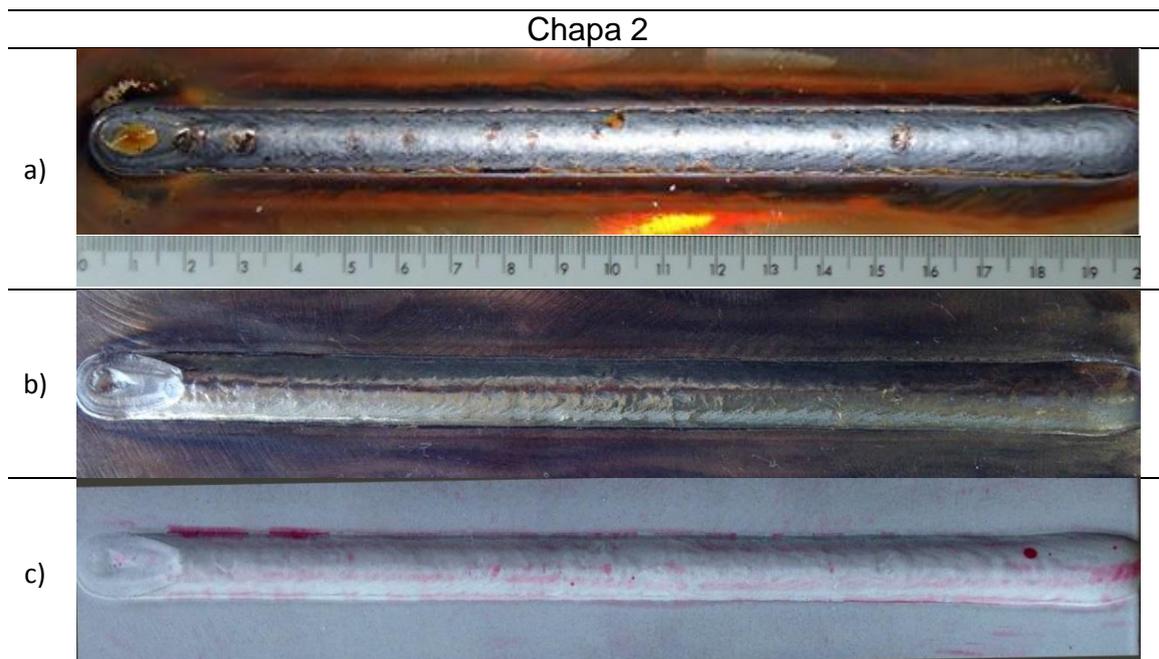


Figura 50: Chapa 2: Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

Chapa 3

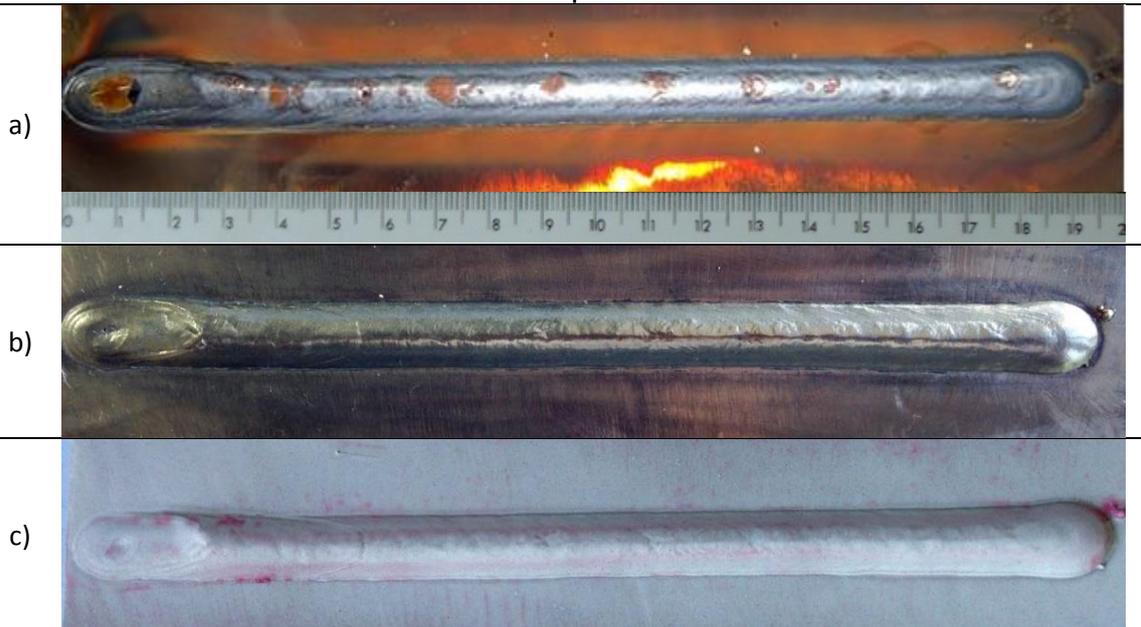


Figura 51: Chapa 3: Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

Chapa 4

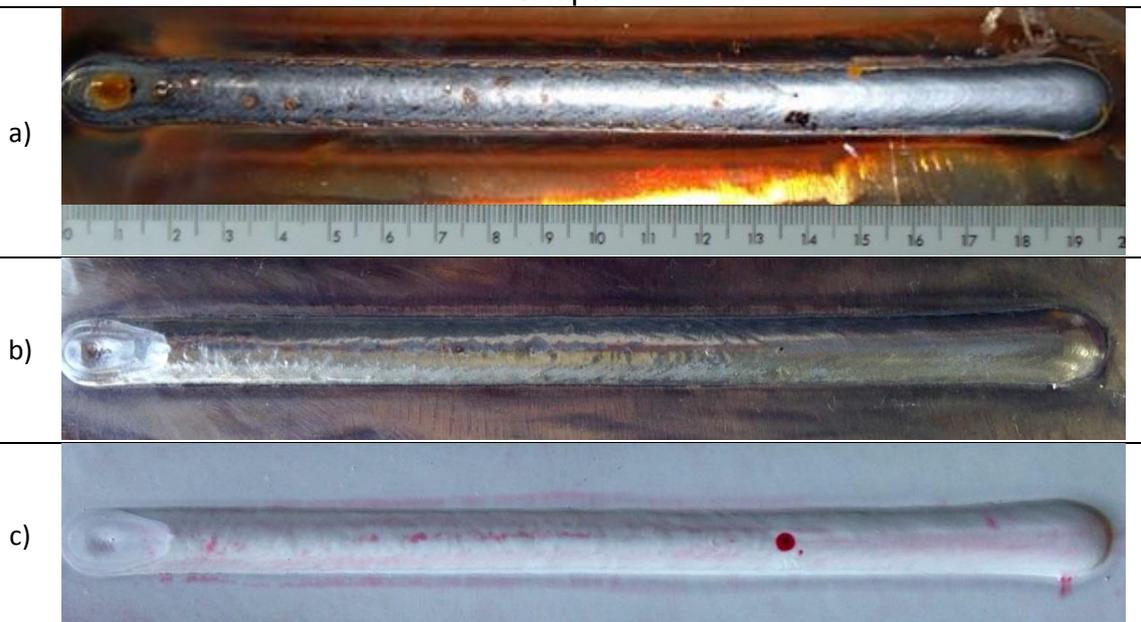


Figura 52: Chapa 4: Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.



Figura 53: Chapa 5: Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆. a) Antes da limpeza, b) após a limpeza e c) durante o ensaio com líquido penetrante.

Pela inspeção visual foi possível perceber a formação de escórias sobre os cordões de soldas realizados com as duas misturas trabalhadas, conforme mostrado nas Figuras 44 a 53, letra a.

Segundo Scotti e Ponomarev (2014), os arames ER70S-6 possuem manganês e silício na sua formulação que funcionam como desoxidantes, enquanto que os gases de proteção com adição de CO₂ e O₂ possuem potencial oxidante para facilitar a emissão de elétrons. O Mn e Si vão se combinar com o O₂ do gás de proteção formando óxidos sobre a solda, que são as chamadas escórias. Uma parte desses elementos viram óxidos e ficam na superfície do cordão e a outra se incorpora como elemento de liga nos próprios cordões (Ribeiro, 2016).

Neste trabalho, foi necessário um ajuste de vazão do gás para evitar a formação de poros, foi utilizando vazão maior comparado a outros trabalhos da literatura, sendo assim é esperado maior formação de escória sobre as soldas. Resende *et al.*, (2009) utilizou 13 l/min para o gás Ar+15%CO₂ no modo de transferência em *spray*, porém não foi verificada a qualidade do cordão de solda que pode ter apresentado poros durante os testes.

O ensaio de líquido penetrante mostrou que em algumas chapas soldadas com o gás propileno houve formação de pequenos poros ao longo dos cordões de solda, conforme apresentado nas Figuras 44 a 53, letra c. A pequena quantidade de

poros observados podem ser característicos de impurezas presentes na chapa ou mesmo liberação de H_2 da dissociação do propileno.

O índice DPPC fornecido pelo SAP também foi utilizado para medir a estabilidade do processo. Quanto menor, maior repetitividade do comportamento e mais estável é a soldagem.

A Figura 54 mostra os resultados do DPPC para as soldas realizadas com $Ar+12\%CO_2$ e $Ar+12\%CO_2+0,4\%C_3H_6$.

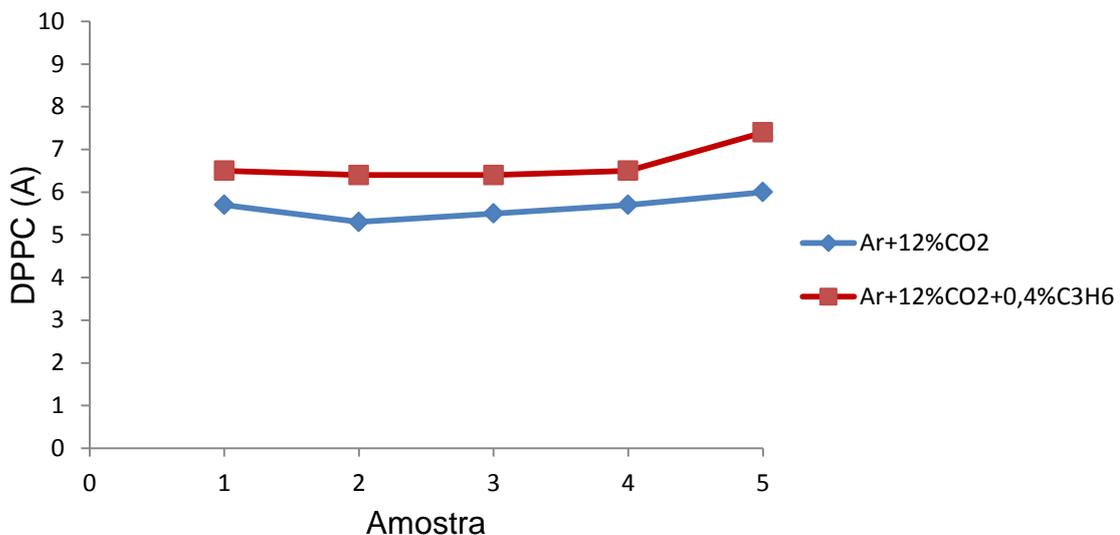


Figura 54: Desvio padrão de pico de corrente (DPPC) para as chapas soldadas com a mistura $Ar+12\%CO_2$ e com a mistura $Ar+12\%CO_2+0,4\%C_3H_6$

As chapas soldadas com a mistura convencional sem adição de propileno apresentou valores menores de DPPC em relação às chapas soldadas com o propileno. Esse resultado era esperado já que na etapa I foi encontrado valores maiores de DPPC após a transição para as soldas com propileno, conforme descrito na Tabela 13.

Segundo Ribeiro (2016) o propileno necessita de maior energia para manutenção do arco, devido ao seu calor específico molar que é quatro vezes maior que do Ar, e duas vezes maior que o CO_2 , sendo assim ele precisa de mais calor para aumentar a sua temperatura em $1^\circ C$. É esperado que as soldas com adição de propileno necessitassem de uma maior tensão para melhorar a estabilidade da transferência.

Souza *et al.* (2011) também relata a necessidade de maior tensão em atmosferas que utilizam gases com maior capacidade térmica, como é o caso do propileno.

Sendo assim, pode ser que as soldas realizadas com a mistura com adição de propileno necessite de maior tensão para abrir e estabilizar o arco elétrico. Isso explica o fato das soldas com propileno apresentarem menor estabilidade na transferência por *spray* utilizando tensão de 31 V. Provavelmente, existe a necessidade de tensão mais elevada para conseguir melhor estabilidade. Outro fato é que o tipo de transferência empregado neste trabalho necessitou de maior DBCP e maior vazão do gás, comparado aos trabalhos que empregaram curto circuito (Ribeiro, 2016). Com isso, provavelmente existe a necessidade de aumentar a quantidade de propileno na mistura a fim de alterar e contribuir para as propriedades da solda.

Apesar do valor maior de DPPC para as soldas que utilizaram o propileno, para os dois gases, foi observado valores bem abaixo daqueles encontrados na literatura. Ribeiro (2016), utilizando transferência por curto circuito, mas com os mesmos gases utilizados neste trabalho, obteve uma média de 115,7 A para Ar+12%CO₂ e 112,9 A para Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆.

Considerações finais da etapa II:

- As soldas obtidas com a mistura de propileno necessitaram de menor corrente em relação à mistura convencional;
- Pela inspeção visual e líquido penetrante, os cordões de solda apresentaram bom aspecto, com incidência de escória e pouca formação de poros nas soldas realizadas com propileno;
- O índice DPPC apresentou valores menores para as soldas que utilizaram o gás sem adição de propileno, porém isto pode estar relacionado à necessidade de uma maior tensão para obtenção de melhor estabilidade.

4.4 Etapa III: Análise do metal de solda.

Esta etapa teve como objetivo avaliar as soldas realizadas na etapa II por meio da geometria do cordão, do índice de convexidade e da penetração. Também foi realizado um estudo da microestrutura do metal de solda e da dureza Vickers. A

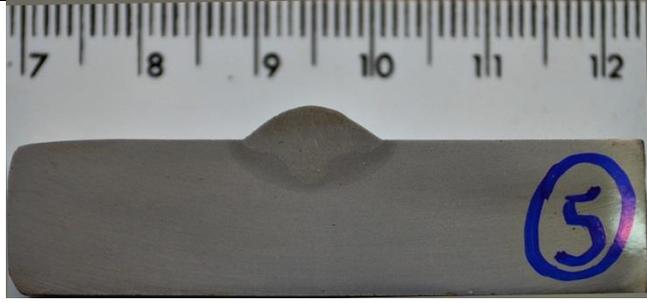
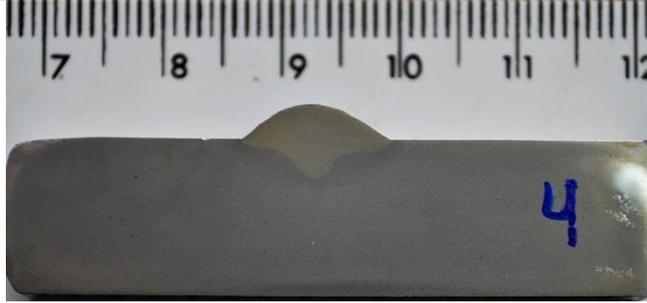
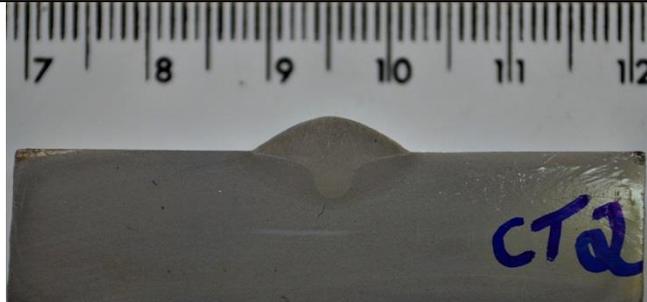
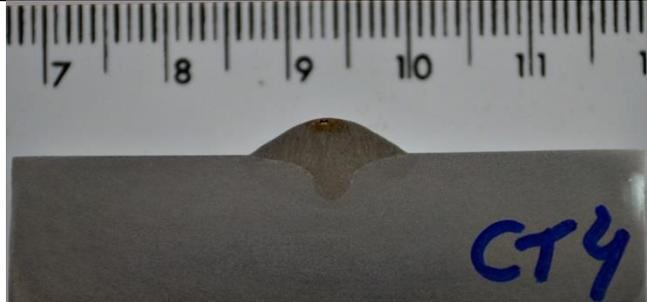
taxa de deposição foi calculada com o intuito de verificar se houve diferença na quantidade de material depositado para cada mistura.

4.4.1 Avaliação geométrica, Índice de convexidade e penetração

A Tabela 15 apresenta as macrografias dos cordões de solda. São apresentados a largura, o reforço, a penetração e o índice de convexidade para as soldas da etapa II.

Essas medidas de largura, reforço e penetração foram realizadas diretamente nas macrografias com auxílio de paquímetro. O cálculo do índice de convexidade foi obtido com o reforço e largura do cordão.

Tabela 15: Características geométricas: macrografias, largura (L), reforço (R), penetração (P) e índice de convexidade (IC).

Ar+12%CO₂	
	L: 11,60 mm R: 3,20 mm P: 6,60 mm IC: 27,58%
	L: 11,75 mm R: 3,55 mm P: 6,15 mm IC: 30,21%
Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆	
	L: 12,00 mm R: 3,00 mm P: 6,60 mm IC: 25,00%
	L: 12,00 mm R: 3,45 mm P: 6,65 mm IC: 28,75%

Observa-se similaridade entre a penetração e largura das soldas obtidas pelas duas misturas de proteção (Ar+12%CO₂ e o Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆). As macrografias não apresentaram descontinuidades ao longo da seção transversal.

Segundo Bonanni (2005), o índice de convexidade mostra informações importantes a respeito da qualidade do cordão. É por esse índice que é possível

prever se a solda apresenta reforço excessivo ou não. Para Silva *et al.*, (2000) os valores de índice de convexidade devem estar próximos de 30% para caracterizar um cordão de solda adequado e de boa geometria. Para os dois tipos de mistura foram encontrados IC próximos de 30%, resultando em boa geometria do cordão de solda.

A penetração para as duas misturas de gases utilizadas também apresentou valores bem próximos e estão bem acima dos valores encontrados na literatura. Trabalhando com transferência por curto-circuito, Ribeiro (2016) encontrou aproximadamente 3,00 mm para o gás Ar+12%CO₂ e 1,70 mm para Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆.

Segundo Modenesi *et al.*, (2012), quanto maior o valor da corrente maior será a penetração. Sendo assim, é esperado que o processo que utiliza o modo de transferência em *spray* tenha uma penetração maior em relação ao processo que utiliza curto circuito que emprega correntes menores.

Os resultados encontrados de penetração também podem estar ligados ao aporte térmico do processo e aos gases de proteção utilizados. A penetração aumenta com o aumento do aporte térmico da soldagem (Faria *et al.*, 2012). Em relação aos gases, misturas de Ar+CO₂ produzem cordões com boa penetração e mais largos, conforme indicado na Figura 32 (Lincoln Electric Company, 2015).

4.4.2 Análise Microestrutural

O objetivo da análise microestrutural foi identificar os microconstituintes presentes no metal de solda para as misturas Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆.

As Figuras 55 e 56 apresentam as microestruturas do metal de solda das duas misturas.

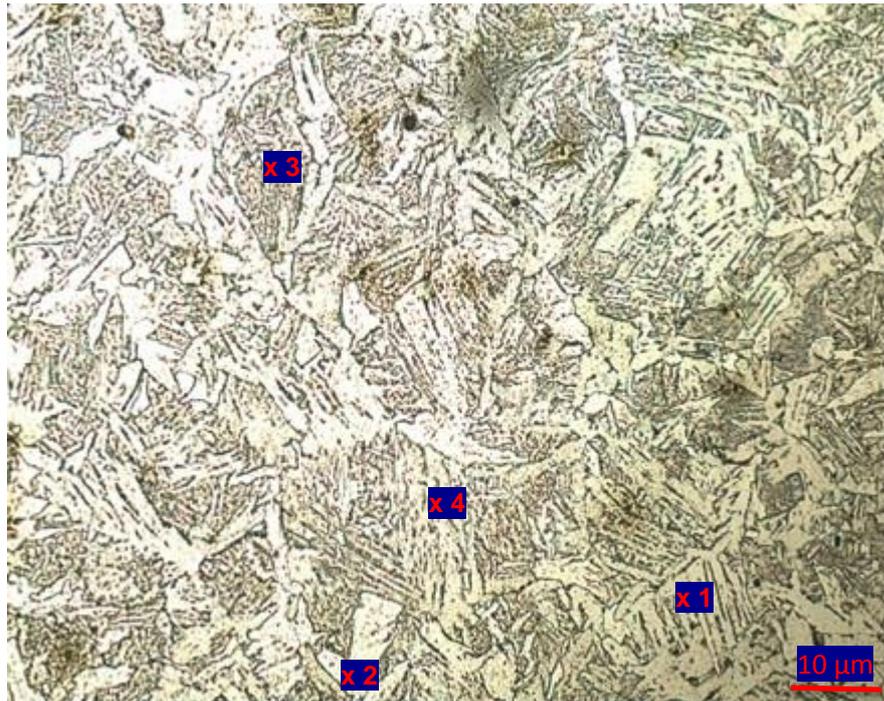


Figura 55: Micrografias do metal de solda; Ar+12%CO₂ - Legenda: 1- FS(A), 2- PF(G), 3-AF e 4-FS(NA). Aumento de 500X.

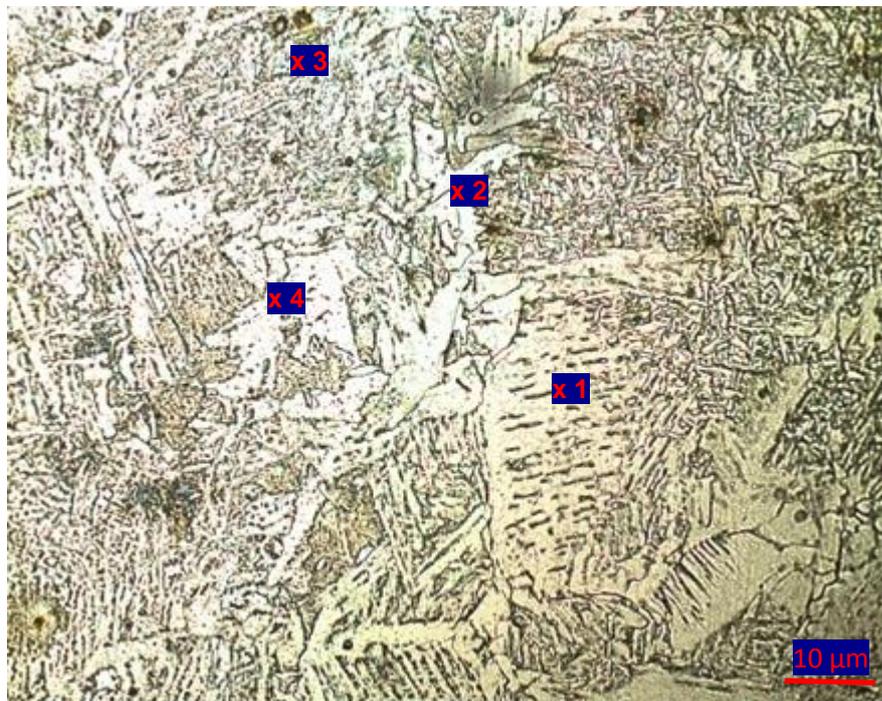


Figura 56: Micrografias do metal de solda; Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ - Legenda: 1- FS(A), 2- PF(G), 3-AF e 4-FS(NA). Aumento de 500X.

Pode-se observar uma quantidade significativa de ferrita acicular AF, ferrita de contorno de grão - PF(G), ferrita com segunda fase alinhada - FS(A) e a ferrita com segunda fase não alinhada - FS(NA). As microestruturas encontradas são semelhantes e típicas de metal de solda de aços ferríticos (Almeida *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2003). Os dois gases apresentaram microestruturas próximas e não foi constatado diferença de microconstituintes ao longo da microestrutura.

4.4.3 Dureza Vickers

A influência da adição de propileno ao gás de proteção também foi analisada através do ensaio de dureza Vickers.

A Tabela 16 mostra os 15 valores de dureza Vickers (HV), medidos aleatoriamente no metal de solda depositado.

Tabela 16: Durezas do metal de solda

Medições	Ar+12%CO ₂	Ar+12%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆
1	183	214
2	210	231
3	218	220
4	215	224
5	211	233
6	219	220
7	216	226
8	219	228
9	214	216
10	215	209
11	204	224
12	202	216
13	208	217
14	202	217
15	175	217
Média	207 ± 13	222 ± 7

Pela Tabela 16 foi observado que a dureza do metal de solda depositado com os gases Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ foram semelhantes, com valores de 207 ± 13 e 222 ± 7, respectivamente.

O valor de dureza um pouco superior das soldas realizadas com propileno podem ser resultado da presença de manganês e silício como elementos de liga, conforme explicação do item 4.3.2.

A dureza em conjunto com a microestrutura das soldas realizadas com as duas misturas não mostraram presença de fases frágeis e duras como a martensita nos metais de solda depositados.

Por fim, a taxa de deposição foi calculada com o objetivo de conferir se a adição de propileno ao gás de proteção influenciou na quantidade de material depositado.

A Figura 57 apresenta os valores de taxa de deposição para as soldas realizadas com as duas misturas analisadas.

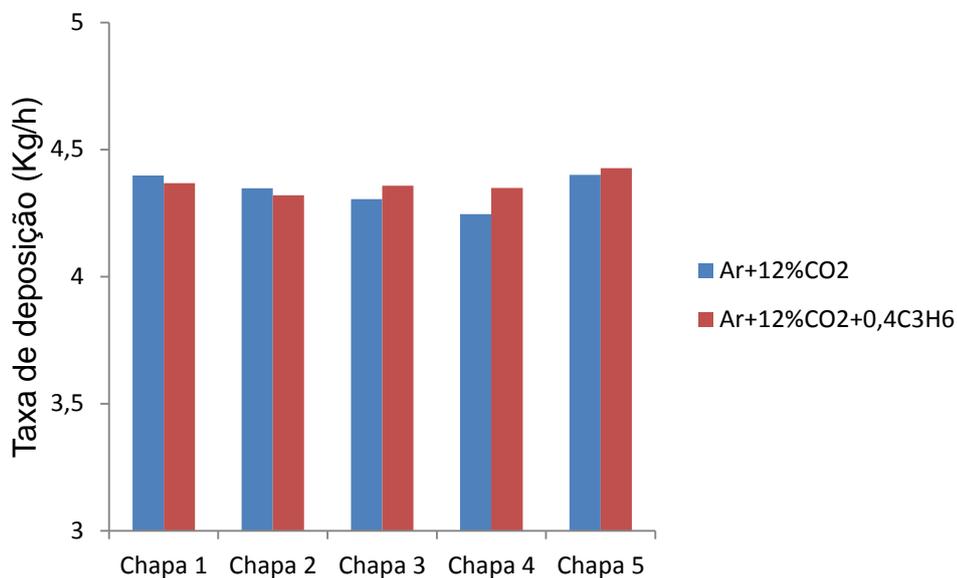


Figura 57: Taxa de deposição para o Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆

Foi observado que a taxa de deposição para as duas misturas de gases tiveram valores muito próximos. Esses resultados seguem o raciocínio da penetração. Quanto maior a corrente utilizada, mais material será depositado, sendo assim é esperado que na transferência em *spray*, o valor de deposição seja maior comparado aos trabalhos que utilizaram transferência por curto circuito (Höhn, 2010).

Todavia, os resultados obtidos de taxa de deposição neste trabalho foram maiores ou muito similares aos resultados de outros trabalhos que também utilizaram transferência em *spray*, mas com gases com maior quantidade de CO₂, ou seja, os valores de taxa de deposição deveriam ser maiores aos encontrados no presente estudo.

Moreira *et al.*, (2006) encontrou taxa de deposição de 3,15 kg/h para soldas realizadas no modo de transferência em *spray*, com o mesmo arame eletrodo (AWS ER70S-6 1,2 mm de diâmetro), gás de proteção Ar+15%CO₂ e tensão de 30 V.

Junior *et al.*, (2015) encontrou taxa de deposição de 4,76 kg/h, também soldando por transferência em *spray*, com o mesmo eletrodo (AWS ER70S-6 1,2 mm de diâmetro), gás de proteção Ar+25%CO₂ e velocidade de alimentação de 7,9 m/min.

Considerações finais da etapa III:

- As macrografias obtidas para as soldas realizadas com as duas misturas de proteção apresentaram valores próximo de reforço, largura e penetração. Além disso, não foram verificados defeitos na região do metal de solda;
- Os valores de IC foram próximos de 30% o que caracteriza soldas com geometria adequada;
- As microestruturas dos metais de solda mostraram a presença em maior quantidade de quatro microestruturas: ferrita acicular, ferrita de contorno de grão, ferrita com segunda fase alinhada e a ferrita com segunda fase não alinhada;
- O valor de dureza para as soldas com propileno foi ligeiramente superior ao valor encontrado para as soldas realizadas com a mistura convencional, isso pode ter relação com a adição de Mn e Si presente na composição do arame. Esses elementos podem ter se incorporado em maior quantidade como elementos de liga nas soldas com propileno;
- Os valores de dureza em conjunto com a análise microestrutural mostram que não houve formação de fases duras e frágeis como a martensita.
- Os valores de taxa de deposição foram bem próximos para os dois tipos de soldas e estão maiores comparados a outros trabalhos que utilizaram gases com maior quantidade de CO₂.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

O estudo comparativo das soldas realizadas com atmosfera gasosa convencional e com atmosfera de proteção com o gás propileno em chapas de aço carbono SAE 1020 utilizando o processo GMAW e no modo de transferência por *spray* permite concluir que:

- Foram encontrados, para as duas misturas de gases, Ar+12%CO₂ e Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆, as médias da corrente de transição para as três velocidades de alimentação propostas (6,7 e 8 m/min). E foi possível verificar que a adição de propileno na mistura de proteção interferiu de forma a reduzir a estabilidade do processo.
- As soldas apresentaram cordões de solda de qualidade, com pequena formação de poros nas chapas realizadas com Ar+12%CO₂+0,4%C₃H₆ que podem ser resultado da liberação de H₂ durante a dissociação do gás combustível.
- As soldas com menor DPPC, ou seja, de melhor estabilidade foram às obtidas com o gás Ar+12%CO₂, entretanto a adição do gás propileno à mistura de gases requer maiores tensões para alcançar a estabilidade.
- Pela análise macrográfica para as duas misturas de gases de proteção, foram encontrados resultados de índice de convexidade próximo de 30% caracterizando soldas com boa geometria.
- Os dois tipos de cordões de solda apresentaram elevada penetração, resultante dos altos valores de corrente utilizados na transferência por *spray*.
- As micrografias e os valores de dureza obtidos não indicaram a presença de fases frágeis e duras. A dureza um pouco mais elevada do Ar+12%CO₂+0,4C₃H₆ pode estar ligada a maior quantidade de Mn e Si adicionadas como elementos de liga no metal de solda.
- A taxa de deposição foi elevada para os dois tipos de solda e também está ligada aos valores de corrente trabalhados. O uso de altas correntes produz alta taxa de deposição, associada à outros parâmetros, como o uso de corrente contínua com polaridade inversa e as características da mistura de proteção.
- A adição de 0,4% de propileno na mistura de proteção Ar+12%CO₂ não causou mudanças significativas nos resultados obtidos neste trabalho que utilizou transferência por *spray* e necessitou de maior vazão de gás e maior DBCP.

Provavelmente, haja necessidade de utilizar uma maior concentração de propileno para esse tipo de transferência, além de soldagem com maiores tensões visto que este gás combustível requer maiores tensões para abrir e estabilizar o arco.

CAPÍTULO 6: SUGESTÕES

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

- Estudar a estabilidade da transferência utilizando tensões maiores que as aqui trabalhadas nesta dissertação, para as soldas realizadas com misturas de proteção acrescidas de propileno;
- Realizar soldas com velocidade de alimentação de 9 m/min para as duas misturas estudadas e analisar o seu efeito na corrente de transição;
- Utilizar máquinas automáticas para soldas realizadas no modo de transferência por *spray* com as duas misturas de proteção analisadas;
- Utilizar maior concentração de propileno na mistura de proteção e fazer a análise da estabilidade e dos cordões de solda na transferência por *spray*;
- Empregar o método de perfilografia para observar a transição Globular-*Spray* pelo tamanho das gotas produzidas;
- Investigar os aspectos econômicos envolvidos na soldagem em atmosferas de proteção com adição dos gases combustíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abendi (2011) *Ensaio Visual e Dimensional de Soldas*. Procedimento de END PR-050. Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção. São Paulo -SP.

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

Acesita, S. A. (2011) *Soldagem dos Aços Inoxidáveis* - Acesita S.A. Associada à USINOR.

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. *Avaliação da junta soldada com suporte cerâmico a base do mineral refratário cordierita*; In: 5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2009, Belo Horizonte - MG, 7p.

Alves, V.J. (2009) *Desenvolvimento de envelopes operacionais para o processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção*. Tese (Mestrado em Engenharia) - Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, 155p.

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*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Itajubá – MG, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 68p.

Bonanni, C. G. (2005) *Uso combinado das técnicas DOE e simulação de Monte Carlo em um processo de soldagem MIG/MAG pulsado*. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Itajubá – MG, Universidade Federal de Itajubá, 104p.

Bracarense, A., Zeemann, A., Almeida, D., Urtado, E., Ferrer, S., Pereira, U. (1994) *A Soldagem GMAW (ou MIG-MAG)*. Revista da soldagem, 4:6-17.

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.

ESAB. (2005) *Metalurgia da Soldagem*. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf> em 25/03/2016. Acesso em 23/03/2017.

ESAB. (2014) *Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW)*. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoldagemmigmag_nova em 22/03/2017.

Faria, P., Soares, J. P., Araujo, F. F. S., Paranhos, R. (2012) *Soldagem em operação: Parte 1 – efeito do arrefecimento causado pelo fluido em tubulações de espessura 11 mm*. V 17, n. 4, p. 280-287.

Filho, E.G.M. (2012) *Estudo da influência relativa das variáveis do processo de soldagem MIG-MAG (GMAW) no passe de raiz*. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Belo Horizonte – MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 86p.

Fogliatto, A. A. B. (2013) *Influência dos parâmetros do processo MIG/MAG com curto-circuito controlado sobre a geometria do cordão de solda*. Tese (Mestrado em Engenharia) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 146p.

Fortes, C. (2005) *Apostila MIG/MAG*. ESAB BR, 135p.

Giraldo, J. Muñoz, D., Aristizábal, S., Suárez, J., Arbeláez, A., Uribe, D. (2008) *Construcción de curvas de corriente de soldadura contra velocidad de alimentación de alambre para El processo GMAW*. Dyna, V. 76, n. 157, p. 205-212.

Gomes, E. B. (2006) *Análise do comportamento da soldagem por curto circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi*. Tese

(Mestrado em Engenharia Mecânica) – Itajubá- Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 119 p.

Höhn, R. P. (2010) *Estudo da sensibilidade dos processos MIG/MAG e arame tubular auto-protegido para a soldagem em operação de dutos*. Trabalho de conclusão de curso – Florianópolis – SC, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 57p.

IIW Sub-Commission IXJ "Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals". IIW Doc. IX-1533-88, 1988.

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

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

Joaquim, R. (2001) *Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem – Módulo II - Processo de Soldagem Arame Tubular*- Centro de Tecnologia de Soldagem, São Paulo.

Jonson, J. A. (1991) *Process Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode Welding Research Supplement* – Welding Journal, Miami, pp. 91s-99s.

Junior, J. C. S., Luz, M. A., Brandi, S. D. (2015) *Comparação da taxa de eficiência de deposição entre os consumíveis E71T-1C*. Revista Soldagem e Inspeção. 20(1):2-15.

Lincoln Electric Company. (2015) *GMAW Welding Guide - Carbon, Low Alloy, and Stainless Steels and Aluminum*. http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf em 22/03/2017.

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

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

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

Menezes, T. P. (2016) *Estudo da adição de hidrogênio em gases de proteção convencionais na soldagem GMAW de aço baixo carbono*. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 108p.

Mick, R. L., Pukasiewicz, A. *Avaliação da estabilidade da tensão e corrente em um processo MIG/MAG*. In: XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2009, São Carlos – SP, 3p.

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

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

Modenesi, P.J., 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., Nixon, J.H. (1994) *Arc instability Phenomena in GMAW Welding*. Welding Research Supplement. September: 219s- 224s.

Modenesi. P.J. (2011) *Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas*. Belo Horizonte - MG, Publicação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

Moreira, A. F., Gallego, J., Tokimatsu, R. C., Yamakami, W. J., Ventrella, V. A. *Caracterização do metal de solda obtidos com arame sólido AWS E70s-6 em função da adição de CO₂ no gás de proteção*. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 2006, Foz do Iguaçu – PR, 10p.

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.

Quinn, T. P., Madigan, R. B., Siewert, T. A. (1994) *An electrode extension model for gas metal arc welding*. Welding journal, Miami, v. 10, n. 73.

Quites, A. M. (2002) *Introdução à soldagem a arco voltaico*. Florianópolis: Soldasoft.

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

Resende, A. (2007) *Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico*. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 126p.

Resende, A. 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*. Revista de Soldagem, São Paulo, v. 14, n. 1.

Ribeiro, R. B. G. (2016) *Estudo do efeito da adição de gás combustível propileno nas atmosferas de proteção convencionais do processo GMAW*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 165p.

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

Scotti, A., Ponomarev, V. (2014) *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 288 p.

Silva, A. F.; Delforge, D. Y. M.; Tokimatsu, R. C.; Ventrella, V. A. (2003) *Análise Microestrutural do Metal de Solda de Perfis Soldados de Um Lado Só Utilizados na Construção Civil*, <http://www.dem.feis.unesp.br/maprotec/publicacoes.shtml> em 03/02/2018.

Silva, C.R., Ferraresi, V.A., Scotti, A. (2002) *A quality and cost approach for welding process selection. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences.* 22(3). ISSN 0100-7386.

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

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. (2010) *Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana.* Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Uberlândia – MG, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 128p.

Souza, D., Rossi, M.L., Keocheguerians, F., Nascimento, V.C.do., Vilarinho, L.O., Scotti, A. (2011) *Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito.* Revista Soldagem e Inspeção. 16(2) 114-122.

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

Teske, M. (2006) *Influência da composição do gás de proteção na soldagem do aço ASTM A516 pelo processo GMAW.* Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Curitiba – PR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 104p.

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, Slovenia, 27.jan.p.369-376.

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 Blucher Ltda. 506 p.

Wainer, E., Brandi, S. D., Mello, F. D. H. (2002) *Soldagem - Processos e Metalurgia*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 494p.

White Martins. (2010) *WHITE MARTINS PRAXAIR INC: Gases Especiais e Equipamentos*.

APÊNDICE I

Tabela 17: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás Ar+12%CO₂

Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
6	219 - 222	
6	213 - 216	

Tabela 18: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás Ar+12%CO₂

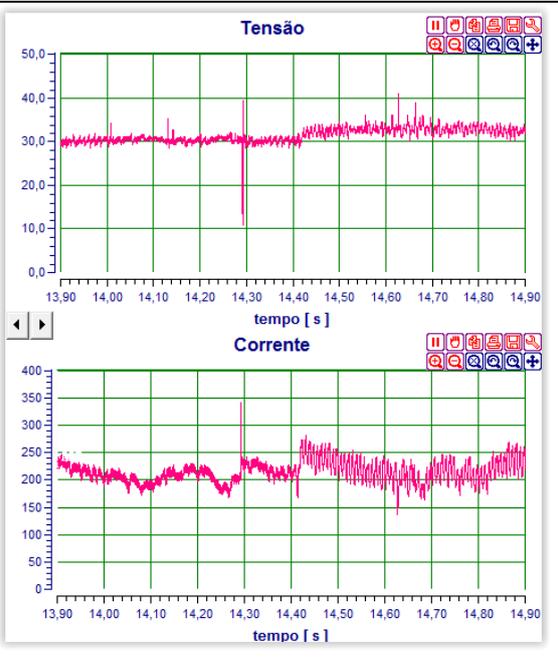
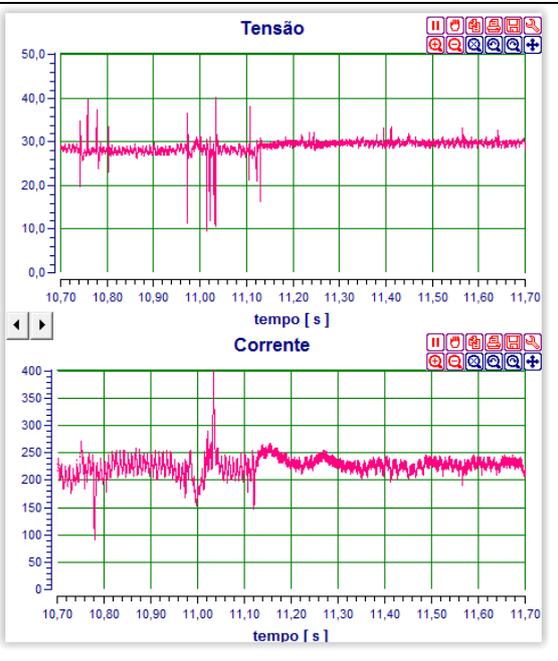
Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
6	215 - 218	
7	227 - 230	

Tabela 19: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás Ar+12%CO₂

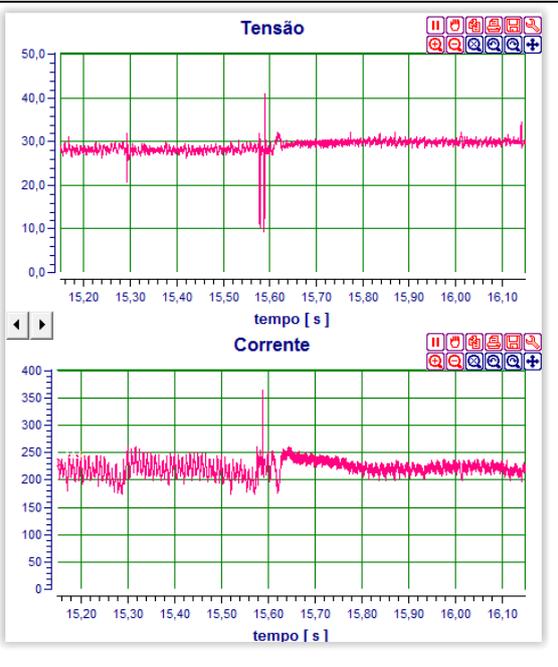
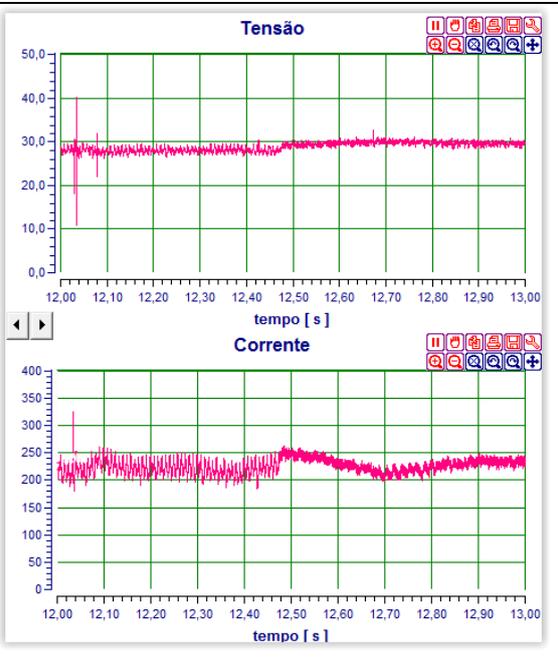
Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
7	223 - 224	
7	224 - 227	

Tabela 20: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás Ar+12%CO₂

Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
8	247 - 251	
8	240 - 242	

Tabela 21: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás Ar+12%CO₂

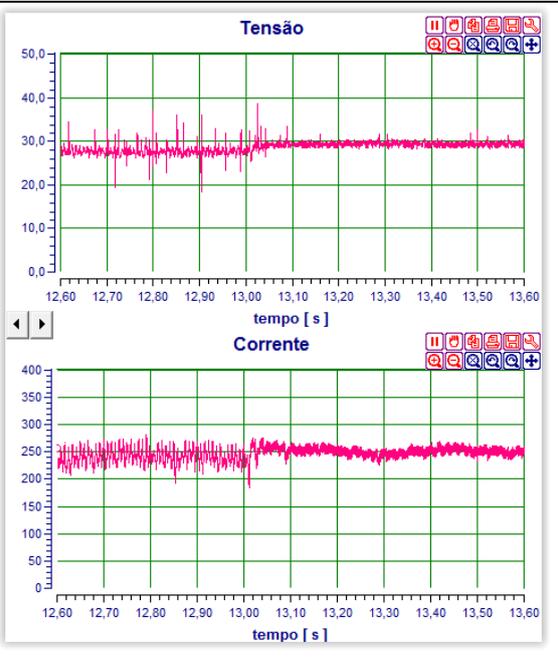
Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
8	247 - 250	 <p>The figure displays two SAP (Signal Acquisition and Processing) graphs. The top graph, titled 'Tensão' (Voltage), shows a noisy signal fluctuating around a mean value of approximately 30V. The y-axis ranges from 0.0 to 50.0, and the x-axis represents time in seconds from 12.60 to 13.60. The bottom graph, titled 'Corrente' (Current), shows a noisy signal fluctuating around a mean value of approximately 250A. The y-axis ranges from 0 to 400, and the x-axis represents time in seconds from 12.60 to 13.60. Both graphs include standard control icons (stop, play, zoom, etc.) in the top right corner.</p>

Tabela 22: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$

Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
6	229 - 231	
6	225 - 226	

Tabela 23: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$

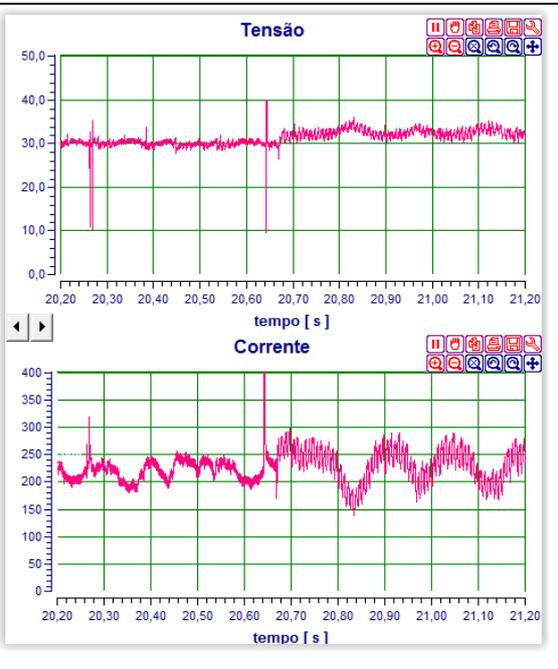
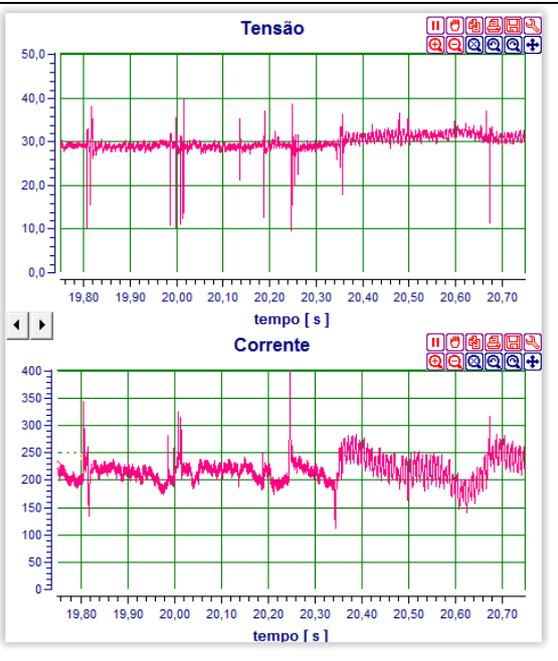
Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
6	228 - 231	 <p>The figure displays two vertically stacked line graphs. The top graph, titled 'Tensão', plots voltage in Volts (V) on the y-axis (0 to 50) against time in seconds (s) on the x-axis (20.20 to 21.20). The signal is a noisy red line centered around 30V, with a prominent spike reaching approximately 40V at 20.65s. The bottom graph, titled 'Corrente', plots current in Amperes (A) on the y-axis (0 to 400) against time in seconds (s) on the x-axis (20.20 to 21.20). The signal is a noisy red line centered around 200A, with a prominent spike reaching approximately 350A at 20.65s. Both graphs include a control toolbar with icons for play, stop, zoom, and pan.</p>
7	217 - 219	 <p>The figure displays two vertically stacked line graphs. The top graph, titled 'Tensão', plots voltage in Volts (V) on the y-axis (0 to 50) against time in seconds (s) on the x-axis (19.80 to 20.70). The signal is a noisy red line centered around 30V, with a prominent spike reaching approximately 40V at 20.25s. The bottom graph, titled 'Corrente', plots current in Amperes (A) on the y-axis (0 to 400) against time in seconds (s) on the x-axis (19.80 to 20.70). The signal is a noisy red line centered around 200A, with a prominent spike reaching approximately 350A at 20.25s. Both graphs include a control toolbar with icons for play, stop, zoom, and pan.</p>

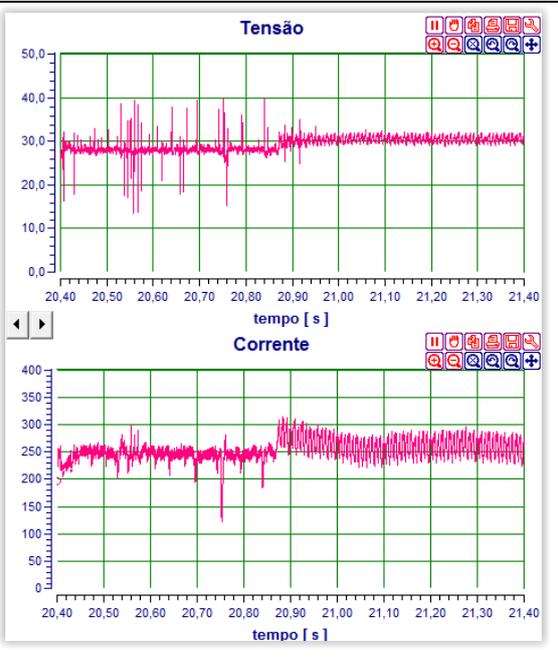
Tabela 24: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$

Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
7	232 - 235	
7	229 - 232	

Tabela 25: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$

Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
8	249 - 252	
8	243 - 246	

Tabela 26: Velocidade de alimentação, faixa de corrente de transição e gráficos apresentados no SAP para os testes realizados para o gás $\text{Ar}+12\%\text{CO}_2+0,4\%\text{C}_3\text{H}_6$

Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa corrente de transição (A)	Gráficos do SAP
8	243 - 248	 <p>The figure displays two SAP (Signal Acquisition and Processing) graphs. The top graph, titled 'Tensão' (Voltage), shows a signal fluctuating around 30V on a scale from 0,0 to 50,0. The bottom graph, titled 'Corrente' (Current), shows a signal fluctuating around 250A on a scale from 0 to 400. Both graphs have a time axis labeled 'tempo [s]' ranging from 20,40 to 21,40. The graphs include standard SAP interface elements like zoom and pan tools.</p>