

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL C_3H_6 NAS
ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO CONVENCIONAIS DO PROCESSO
GMAW

RENATA BARBOSA GONÇALVES RIBEIRO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
Setembro - 2016

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL C₃H₆ NAS
ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO CONVENCIONAIS DO PROCESSO GMAW

RENATA BARBOSA GONÇALVES RIBEIRO

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

185/2016

Ribeiro, Renata Barbosa Gonçalves

Estudo do efeito da adição de gás combustível C_3H_6 nas atmosferas de proteção convencionais do processo GMAW / Renata Barbosa Gonçalves Ribeiro. – Campos dos Goytacazes, 2016.

xi, 165 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) --

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2016.

Orientador: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos.

Área de concentração: Metalurgia física.

Bibliografia: f. 156-165.

1. ESTABILIDADE 2. GMAW 3. ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO 4. PROPILENO I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título

CDD

669.94

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL C₃H₆ NAS
ATMOSFERAS CONVENCIONAIS DE PROTEÇÃO DO PROCESSO GMAW

RENATA BARBOSA GONÇALVES RIBEIRO

Projeto de Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovada em 14 de Setembro de 2016.

Comissão Examinadora:

Prof. Américo Scotti (PhD. Tecnologia da Soldagem) – UFU / UNIVERSITY WEST

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

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

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (PhD. Engenharia Mecânica) – UENF

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

"Antes do compromisso há hesitação, a oportunidade de recuar, a ineficácia permanente. Em todo ato de iniciativa (e de criação), há uma verdade elementar cujo desconhecimento destrói inúmeras idéias e planos esplêndidos: no momento em que nos comprometemos de fato, a providência age também. Ocorre toda espécie de coisas para nos ajudar, coisas que de outro modo nunca ocorreriam. Toda uma cadeia de eventos surge da decisão, fazendo vir em nosso favor todo tipo de encontros, de incidentes e de apoio material imprevistos que ninguém poderia sonhar que viria em seu caminho. Comece tudo o que pode fazer, ou que sonha que pode fazer. Há gênio, poder e magia na Ousadia" (trecho do livro "Fausto", de Johann Goethe).

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram na criação das condições necessárias para realização desse sonho. Em especial a minha mãe Luciene Barbosa e Antônio Myra, meu esposo Rodrigo Ribeiro e minha filha Tainá por compreenderem as ausências necessárias.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua infinita misericórdia em minha vida.

Ao querido Antonio e minha mãe Luciene por me doarem esse tempo de suas vidas para que pudesse ampliar o meu.

Ao meu pai Carlos Augusto por sua torcida e apoio.

Ao meu marido Rodrigo Ribeiro por seu amor e compreensão tão necessários nesse período. Também pela chegada da nossa filha Tainá em nossas vidas que ampliou nossos horizontes e projetos.

Aos meus padrinhos Tereza e Laélcio Roza por sempre me apoiarem.

A minha irmã Juliana e cunhado Thiago Muniz pela compreensão e amor.

Ao amigo e compadre Everton Maick por tanto tempo de dedicação e amizade.

Aos amigos encontrados na UENF: Zulmira Guimarães, Andrey Alves, Soraya. Luiz Tatagiba por me disponibilizar momentos aprendizagem ao longo de nossa convivência. Thiago Menezes pelo apoio nas atividades experimentais.

Aos professores Cátia Viana, Lioudmila Matlakhova e Eduardo Atem por suas sugestões e disponibilidade nos requisitos necessários para conclusão dessa tese.

Ao incentivo dos professores Ana Lúcia Diegues e Herval Paes, para permanência no PPECM.

Aos técnicos Bruno e Silvio do LAMAV/UENF pela disponibilidade durante toda a parte experimental.

Aos colaboradores do Laboratório de Soldagem do Centro de Tecnologia Rio da White Martins Gases Industriais Ltda. Em especial as contribuições do engenheiro Marcos Lobato e do soldador Paulo Cezar de Souza nas discussões ao longo dos experimentos.

Aos funcionários Paulo Faria, Julio Vervloet, Manoel Coelho, Guilherme Boechat, Ramon Fernandes e Leonardo Cavadas do setor UO-BC/IPP/EISUP-PETROBRAS.

Ao Thiago Cruz do setor E&P-SERV/US-SOEP/OM/OPR-PETROBRAS.

Ao prof. orientador Ronaldo Paranhos por seu comprometimento profissional, dedicando grande parte do seu tempo e experiência, tão necessários para o êxito dessa pesquisa.

A todos que colaboraram de forma direta ou indiretamente neste trabalho: muito obrigado.

SUMÁRIO

Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	ix
Lista de Abreviaturas	xi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral.....	3
1.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificativas	4
1.4 Ineditismo	6
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 O Arco Elétrico na Soldagem GMAW	7
2.1.1 Estabilidade do Arco.....	10
2.2 Transferência Metálica	15
2.2.1 Transferência por Curto-Circuito.....	18
2.2.2 Transferência Globular	20
2.2.3 Transferência por Spray	20
2.3 Estabilidade do Processo GMAW com Transferência Metálica por Curto-Circuito	21
2.4 Fundamentação Teórica da Formulação de Atmosferas de Proteção.....	26
2.4.1 Propriedades dos Gases	28
2.4.2 Atmosferas de Proteção Convencionais.....	32
2.4.3 Propileno	37
2.5 Comportamento dos Gases de Proteção nas Altas Temperaturas.....	38
2.5.1 Gases Combustíveis.....	45

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Materiais	53
3.2 Metodologia	54
3.2.1 Soldagem	54
3.2.2 Obtenção das Atmosferas de Proteção	56
3.2.3 Etapa I - Avaliação da Adição do Gás Combustível Propileno em Atmosferas de Proteção Convencionais na Soldagem GMAW	58
3.2.3.1 Atmosferas de Proteção Utilizadas na Soldagem.....	58
3.2.3.2 Avaliação dos Cordões de Solda.....	59
3.2.3.2.1 Inspeção Visual e Líquido Penetrante	59
3.2.3.2.2 Características Geométricas.....	60
3.2.3.3 Avaliação da Repetitividade da Transferência Metálica	61
3.2.4 Etapa II - Definição dos Teores de Adição de Propileno nas Atmosferas Convencionais com Melhor Estabilidade	61
3.2.4.1 Atmosferas de Proteção Utilizadas na Soldagem.....	61
3.2.4.2 Avaliação dos Cordões de Solda.....	62
3.2.4.3 Avaliação da Repetitividade da Transferência Metálica	62
3.2.5 Etapa III - Comparação da Estabilidade do Processo GMAW com Adições de Propileno nas Atmosferas de Proteção Convencionais em duas faixas de I X U	63
3.2.5.1 Atmosferas de Proteção Utilizadas na Soldagem.....	63
3.2.5.2 Avaliação dos Cordões de Solda.....	64
3.2.5.3 Estimativa da Estabilidade do Processo GMAW	64
3.2.6 Etapa IV - Caracterização do Metal de Solda Depositado nas atmosferas de Proteção com Adições de Propileno.....	65
3.2.6.1 Atmosferas de Proteção da Soldagem	65
3.2.6.2. Análise Química.....	65
3.2.6.3 Análise Microestrutural	66
3.2.6.4 Análise de Microdureza Vickers.....	67
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1 Etapa I: Avaliação da Adição de propileno em Atmosferas de Proteção Convencionais na Soldagem GMAW.....	68
4.1.1 Cordões de Solda	70
4.1.1.1 Inspeção Visual e Líquido Penetrante	70

4.1.1.2 Características Geométricas.....	74
4.1.2 Repetitividade da Transferência Metálica.....	77
4.1.3 Considerações Finais	78
4.2 Etapa II: Determinação dos Teores de Adição de Propileno nas Atmosferas de Proteção que Apresentam Melhor Estabilidade do Processo.....	79
4.2.1 Cordões de Solda	81
4.2.1.1 Inspeção Visual e Líquido Penetrante	81
4.2.1.2 Características Geométricas.....	86
4.2.2 Repetitividade da Transferência Metálica.....	96
4.2.3 Considerações Finais	101
4.3 Etapa III: Comparação da Estabilidade do Processo GMAW em Atmosferas de Proteção Convencionais e com Adições do Gás Combustível Propileno.....	102
4.3.1. Cordões de Solda	105
4.3.1.1 Inspeção Visual e Líquido Penetrante	105
4.3.1.2 Características Geométricas.....	112
4.3.2. Picos de Corrente	118
4.3.3 Histogramas dos Picos de Corrente	122
4.3.4 Tempos de Arco Aberto, Tempos de Curto-Circuito e Períodos de Transferências.....	131
4.3.5 Ciclogramas.....	135
4.3.6 Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IVcc)	143
4.3.7 Considerações Finais	146
4.4 Etapa IV: Caracterização do Metal de Solda Depositado nas Atmosferas de Proteção com Adições do Gás Combustível Propileno	147
4.4.1 Considerações Finais	152
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	153
CAPÍTULO 6: SUGESTÕES.....	154
CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	156

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema do processo de soldagem GMAW (Modenesi e Marques, 2000).	8
Figura 2: Regiões do arco elétrico (Scotti e Ponomarev, 2014).	9
Figura 3: a) Painel de conexões do SAP V4.0, b) interface do software,	11
Figura 4: Oscilograma da I x U de soldagem identificando os índices básicos t_{ab} e t_{cc} na transferência por curto circuito.	13
Figura 5: Classificações dos modos de transferência metálica (Scotti <i>et al.</i> , 2012).	18
Figura 6: Esquema da transferência por curto-circuito (Modenesi, 2009).	19
Figura 7: Oscilograma da transferência globular (Modenesi, 2009).	20
Figura 8: Histogramas: a) períodos transferência com taxa de decrescimento da corrente de 44 A/ms; b) períodos transferência com taxa de decrescimento da corrente de 20 A/ms (Adaptado - Dutra, 2008).	22
Figura 9: Ciclograma.	23
Figura 10: Variação da condutividade térmica em função da temperatura (Tušek e Suban, 2000).	31
Figura 11: Esquema da interação dos elétrons com a camada de óxido	39
Figura 12: Etapas da decomposição do metano (Rodrigues, 1994).	45
Figura 13: Decomposição de um alceno (Solomons, 1996).	50
Figura 14: Energia de dissociação de hidrocarbonetos (Ramalho, 2008).	51
Figura 15: Equipamentos utilizados na realização da soldagem.	55
Figura 16: Misturador com rotâmetros (Lobato e Neto, 2003).	57
Figura 17: Exemplo da planilha utilizada no Programa ROTO_BR.	57
Figura 18: Esquema representativo da almofada para retirada de amostras da análise química (ASME SFA-5.18 / SFA-5.18M, 2007).	66
Figura 19: Geometria da solda - etapa I.	75
Figura 20: Comparação entre os parâmetros I x U ajustados nas etapas I e II.	80
Figura 21: Geometria das soldas em atmosferas Ar+12CO ₂ +1C ₃ H ₆ , Ar+12CO ₂ +0,5C ₃ H ₆ , Ar+23,75CO ₂ +1,25C ₃ H ₆ , Ar+25CO ₂ +1C ₃ H ₆ , Ar+25CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	86

Figura 22: Geometria das soldas em atmosferas CO ₂ puro e com adições de propileno - etapa II.....	87
Figura 23: Geometria das soldas nas atmosferas de proteção Ar+12CO ₂ e com adições de propileno - etapa I e II.....	88
Figura 24: Geometria das soldas nas atmosferas de proteção Ar+23,75CO ₂ +1,25C ₃ H ₆ , Ar+25CO ₂ +1C ₃ H ₆ , e Ar+25CO ₂ +0,5C ₃ H ₆ - etapa I e II.	89
Figura 25: Geometria das soldas nas atmosferas de proteção CO ₂ puro e com adições de propileno - etapa I e II.....	90
Figura 26: Variações do índice de convexidade das soldas das etapas I e II em função dos teores de C ₃ H ₆ nas atmosferas de proteção.	92
Figura 27: Taxas de deposição das soldas em atmosferas Ar+12CO ₂ com adições de propileno - etapa I e II.....	94
Figura 28: Taxas de deposição das soldas em atmosferas Ar+25CO ₂ com adições de propileno - etapa I e II.....	94
Figura 29: Taxas de deposição das soldas em atmosferas CO ₂ com adições de propileno - etapa I e II.....	95
Figura 30: Variação do tcc e tab em função da adição de propileno nas atmosferas de proteção - etapa I e II.....	98
Figura 31: Período de Transferências, desvio padrão do período de curto circuito e desvio padrão do período de arco aberto em função das adições de C ₃ H ₆ nas atmosferas de proteção das etapas I e II.....	100
Figura 32: Variação dos valores médios de I x U das soldas nas atmosferas de proteção - etapa III.....	104
Figura 33: Índice de convexidade e geometria das soldas em função da adição de C ₃ H ₆ nas atmosferas de proteção e dos ajustes de IxU - etapa III.	115
Figura 34: Taxa de deposição em função do teor de adição de propileno nas atmosferas de proteção - etapa III.....	117
Figura 35: Variação da taxa de decrescimento da corrente (di/dt D), média dos picos de corrente (MPC) e desvio padrão dos picos de corrente (DPPC) para as atmosferas convencionais e com adição de propileno - etapa III.	121
Figura 36: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de Ar+12CO ₂ e Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	123
Figura 37: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de Ar+12CO ₂ e Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	124

Figura 38: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de Ar+25CO ₂ e Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	126
Figura 39: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de Ar+25CO ₂ e Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆ - etapa III.....	127
Figura 40: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de CO ₂ e CO ₂ +1,3C ₃ H ₆	129
Figura 41: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de CO ₂ e CO ₂ +1,3C ₃ H ₆	130
Figura 42: Variação das médias do tempo de arco aberto (t _{ab}), desvio padrão dos tempos de arco aberto (DPAA), médias dos tempos de curtos circuitos (t _{cc}), desvio padrão dos tempos de curto circuitos (DPCC) e médias dos períodos de transferências (P) - etapa III.	135
Figura 43: Ciclogramas das soldas em atmosferas Ar+12CO ₂ e Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆ no ajuste 1 - etapa III.....	137
Figura 44: Ciclogramas das soldas em atmosferas Ar+12CO ₂ e Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆ no ajuste 2 - etapa III.....	138
Figura 45: Ciclogramas das soldas em atmosferas Ar+25CO ₂ e Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆ no ajuste 1 - etapa III.....	139
Figura 46: Ciclogramas das soldas em atmosferas Ar+25CO ₂ e Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆ no ajuste 2 - etapa III.....	140
Figura 47: Ciclogramas das soldas em atmosferas CO ₂ e CO ₂ +1,3C ₃ H ₆ no ajuste 1 - etapa III.....	141
Figura 48: Ciclogramas das soldas em atmosferas CO ₂ e CO ₂ +1,3C ₃ H ₆ no ajuste 2 - etapa III.....	142
Figura 49: Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IVcc)- etapa III.	144
Figura 50: Morfologias da ferrita no metal de solda em atmosfera Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	149
Figura 51: Morfologias da ferrita no metal de solda em atmosfera Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	150
Figura 52: Morfologias da ferrita no metal de solda em atmosfera CO ₂ +1,3C ₃ H ₆ . .	150

Índice de Tabelas

Tabela 1: Propriedades dos gases.	29
Tabela 2: Formulações de gás de proteção para soldagem a arco elétrico	34
Tabela 3: Energia Média de Ligação C-H na molécula do CH ₄ (Russell, 1994).	46
Tabela 4: Energia Média de Ligações múltiplas do C (Russell, 1994).	46
Tabela 5: Valores da entalpia de formação de espécies	47
Tabela 6: Mecanismos de reações de combustão (Martins, 2011).	48
Tabela 7: Variáveis fixas para as primeiras três etapas.	55
Tabela 8: Atmosferas de proteção - etapa I.	58
Tabela 9: Índices para análise da	61
Tabela 10: Atmosferas de Proteção - etapa II.	62
Tabela 11: Índices para análise da	63
Tabela 12: Identificação da regulagem de I x U de soldagem - etapa III.	63
Tabela 13: Atmosferas de proteção - etapa III.	64
Tabela 14: Valores médios da velocidade de alimentação de arame, corrente e tensão durante a soldagem - etapa I.	69
Tabela 15: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem, limpeza e ensaio LP - etapa I.	71
Tabela 16: Índice de Convexidade (IC) - etapa I.	75
Tabela 17: Taxa de deposição - etapa I.	76
Tabela 18: Resultados dos índices tempo de arco aberto (t_{ab}); tempo de curto circuito (t_{cc}); período de transferências (P); desvio padrão do período de arco aberto (DPAA) e o desvio padrão dos períodos de curto circuito (DPCC) - etapa I.	77
Tabela 19: Valores médios da velocidade de alimentação de arame, corrente e tensão durante a soldagem - etapa II.	79
Tabela 20: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem, limpeza e ensaio LP - etapa II.	82
Tabela 21: IC das soldas - etapa II.	91
Tabela 22: Taxa de deposição - etapa II.	93

Tabela 23: Resultados dos índices média dos tempos de arco aberto (t_{ab}), média dos tempos de curto-circuito (t_{cc}), média dos períodos de transferências (P), desvio padrão dos períodos de arco aberto (DPAA), desvio padrão dos períodos de curto-circuito (DPCC) - etapa II.....	96
Tabela 24: Regulagem da corrente e tensão durante a soldagem - etapa III.....	103
Tabela 25: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas Ar+12CO ₂ e Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆ , no ajuste 1 - etapa III.	106
Tabela 26: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas Ar+12CO ₂ e Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆ , no ajuste 2 - etapa III.	107
Tabela 27: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas Ar+25CO ₂ e Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆ , no ajuste 1 - etapa III.	108
Tabela 28: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas Ar+25CO ₂ e Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆ , no ajuste 2 - etapa III.	109
Tabela 29: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas CO ₂ e CO ₂ +1,3C ₃ H ₆ , no ajuste 1 - etapa III.	110
Tabela 30: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas CO ₂ e CO ₂ +1,3C ₃ H ₆ , no ajuste 2 - etapa III.	111
Tabela 31: Macrografias das soldas no ajuste 1 - etapa III.	113
Tabela 32: Macrografias das soldas no ajuste 2 - etapa III.	114
Tabela 33: Taxa de deposição das soldas - etapa III.	116
Tabela 34: Média dos picos de corrente (MPC), desvio padrão dos picos de corrente(DPPC) e taxa de decrescimento da corrente (diD/dt) das soldas nas atmosferas - etapa III.....	119
Tabela 35: Resultados das médias dos tempos de arco aberto (t_{ab}), desvio padrão dos tempos de arco aberto (DPAA), médias dos tempos de curto circuito (t_{cc}), desvio padrão dos tempos de curto circuito (DPCC),	132
Tabela 36: Índice Vilarinho de regularidade da transferência por Curto-Circuito (IVcc) - etapa III.	143
Tabela 37: Resultados da análise química do metal de solda depositado em função das atmosferas de proteção - etapa III.	148
Tabela 38: Microdurezas do metal de solda.	151

Lista de Símbolos

Al - Alumínio

Ar - Argônio

atm - Atmosfera

B - Campo magnético

C - Carbono

°C - Graus Celsius

CH₄ - Metano

C₃H₆ - Propeno, nomenclatura usual propileno

CO - Monóxido de carbono

CO₂ - Dióxido de carbono

d_{A,B} - Densidade de A em relação a B

d_{A,Ar} - Densidade relativa

diD/dt - Taxa de decrescimento da corrente

σ - desvio padrão

ΔG° - Padrão molar de energia livre de Gibbs

Δi - Variação da corrente

ΔH° - Entalpia de formação

ΔU/ΔI - Gradiente de tensão e corrente

eV - Elétron-volt

Fe - Ferro

He - Hélio

H₂ - Hidrogênio

I - Corrente

IV_{cc} - Índice Vilarinho de regularidade da transferência por curto-circuito

J - Densidade da corrente

K - Kelvin

la - largura

Mn - Manganês

μ₀ - Permeabilidade magnética

N₂ - Nitrogênio

n - Quantidade de matéria, mol

O_2 - Oxigênio

P_A - Pressão atmosférica

P_s - Pressão

P - Média dos períodos de transferências

PC - Média dos picos de corrente

π - Pi

r - Seção de um condutor

r_f - reforço

S - Enxofre

Si - Silício

T - Temperatura

t_{ab} - Média dos tempos de arco aberto

t_{cc} - Média dos tempos de curto-circuito

T_d - Taxa de deposição

Ti - Titânio

U - Tensão

V - Volume

V_{ar}^0 - Ar estequiométrico

$V_{O_2}^s$ - Volume estequiométrico de oxigênio teórico necessário

\bar{x} - média

Lista de Abreviaturas

AF - Ferrita acicular
AGA - *The Linde Gas Group*
ASME - *American Society of Mechanical Engineers*
AWS - *American Welding Society*
CNTP - Condições normais de temperatura e pressão
DBCP - Distância do Bico de Contato a Peça
DPAA - Desvio padrão dos períodos de arco aberto
DPCC - Desvio padrão dos períodos de curto circuito
DPPC - Desvio padrão dos picos de corrente
FFT - *Fast Fourier Transform*
FS(A) - Ferrita com segunda fase alinhada
FS(NA) - Ferrita com segunda fase não alinhada
GMAW - *Gas Metal Arc Welding*
IC - Índice de Convexidade
IIW - *International Institute of Welding*
IUPAC - *International Union of Pure and Applied Chemistry*
LP - Líquido penetrante
MAG - *Metal Active Gas*
MIG - *Metal Inert Gas*
SAE - *Society of Automotive Engineers*
PF(G) - Ferrita de contorno de grão
PF(I) - Ferrita poligonal intragranular
SAPV4 - Sistema de Aquisição de dados de Soldagem
TIG - Tungsten Inert Gas

RESUMO

Neste trabalho é analisado o efeito da adição de um gás combustível, no caso o propileno (C_3H_6) nas atmosferas de proteção convencionais Ar + 12% CO_2 ; Ar + 25% CO_2 e CO_2 onde foram estudados aspectos referentes a estabilidade do processo, na soldagem GMAW do aço SAE 1020 com transferência metálica por curto-circuito. A metodologia foi desenvolvida em quatro etapas. Na etapa I foi identificado o limite máximo de tolerância para adição do propileno: até 1% de C_3H_6 nas misturas Ar + 12% CO_2 e Ar + 25% CO_2 e até 2,5% de C_3H_6 para o CO_2 , que resultaram em soldas aceitáveis. Na etapa II foi identificado, nos teores estudados, soldas de melhor estabilidade quando adicionado um teor de 0,5% de C_3H_6 nas misturas Ar+12% CO_2 e Ar+25% CO_2 e de 1,5% de C_3H_6 em CO_2 . Na etapa III foram comparadas a estabilidade do arco e da transferência metálica na soldagem em Ar + 12% CO_2 + 0,4% C_3H_6 ; Ar+25% CO_2 +0,6% C_3H_6 e 98,7% CO_2 +1,3% C_3H_6 com as nas atmosferas convencionais. De uma forma geral, os resultados evidenciam que embora os cordões de solda sejam semelhantes, a adição de propileno proporcionou melhoria na estabilidade devido às menores variações da corrente, maior média dos picos de corrente e da taxa de descida da corrente, menor desvio padrão dos períodos de curto-circuito. As adições de propileno também proporcionaram melhoria na transferência metálica, aumentando a duração da transferência da gota fundida para a poça de fusão, a regularidade dos períodos de crescimento e de transferência das gotas. Na etapa IV foi estudado o metal depositado nas mesmas atmosferas com adição de propileno da etapa III, no que se refere à microestrutura, composição química e dureza. Não foram encontradas alterações significativas se comparadas as soldas em atmosferas convencionais. Por fim, os resultados acima também permitem concluir que, nas condições estudadas, as adições de um gás combustível, no caso o propileno, conferiram melhoria na estabilidade do processo na soldagem GMAW do aço com transferência por curto-circuito.

Palavras-chave: Estabilidade. GMAW. Atmosferas de Proteção. Propileno.

ABSTRACT

This work has examined the effect of adding a fuel gas, in this case propylene (C_3H_6), on conventional protection atmospheres: Ar + 12% CO_2 ; Ar + 25% CO_2 and CO_2 on which were studied the aspects referring to the process stability in SAE 1020 steel welding GMAW metal transfer short circuit process. The methodology was developed in four steps. Step I consisted of identifying the maximum tolerance limit for adding propylene: up to 1% of C_3H_6 in the mixture Ar + 12% CO_2 and Ar + 25% CO_2 , and up to 2.5% of C_3H_6 to CO_2 , resulting in acceptable welds. In step II was found, in the studied concentrations, better stability results in welds when adding 0.5% C_3H_6 to the mixture Ar + 12% CO_2 and 25% CO_2 and 1.5% C_3H_6 to CO_2 . Step III compared the stability of the arc and metal transfer in welding containing Ar + 12% CO_2 + 0.4% C_3H_6 ; Ar + 25% CO_2 + 0.6% C_3H_6 and 98.7% CO_2 + 1.3% C_3H_6 to the conventional atmospheres. In general, the results evidence that, despite the weld beads are similar, the addition of propylene afforded improvements stability because of the minor variations in current. The greater the average of the current peaks and the decreasing rate of the current, the lower deviation pattern of short-circuit periods are. The propylene additions also provided improvements in the of metal transfer, increasing the duration of the transfer of the molten droplet to the weld pool, the regularity of periods of growth and the transfer of the drops. Step IV studied the metal deposit under the same atmospheres addition of propylene as in Step III, in respect to microstructure, hardness and chemical composition. No significant changes were found when comparing welds to conventional atmospheres. Finally, the above results also indicate that the addition of a fuel gas, such as propylene under the conditions of this study, improve the process stability in steel GMAW welding with short circuit transfer.

Keywords: Stability. GMAW. Atmospheres protection. Propylene.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é amplamente empregado na fabricação e reparo de componentes metálicos e de equipamentos para as mais diversificadas finalidades. É utilizado há muitas décadas e com amplo desenvolvimento no campo de pesquisas científicas. Desde o seu surgimento, sua evolução acompanha a criação de novos equipamentos, consumíveis e condições de trabalho. Estes influenciam a qualidade, o custo da junta soldada e consequentemente a produtividade.

Embora o processo tenha sido amplamente estudado, os fenômenos envolvidos na interação entre o metal líquido e sólido, os gases de proteção e o arco elétrico assim como as características e interações entre as variáveis do processo e os modos de transferência de metal ainda possibilitam novas pesquisas (Modenesi *et al.*, 2011).

A fonte de calor para o processo GMAW é um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é devido a utilização de uma atmosfera protetora (Scotti e Ponomarev, 2014). Os parâmetros que afetam o arco são: corrente; tensão; velocidade de alimentação do arame; ângulo da tocha; comprimento livre do arame; distância do bico a peça; a posição de soldagem e o tipo de gás de proteção (Ibrahim *et al.*, 2012). O processo é muito sensível a variações nos parâmetros operacionais devido terem uma interdependência (Modenesi *et al.*, 2011).

Em geral, os problemas encontrados na utilização desse processo, são relacionados a fonte de energia e sua oscilação, aos gases utilizados para proteção da poça de solda e a regulagem dos parâmetros de soldagem de forma a manter o processo em condições de estabilidade. Entende-se por estabilidade neste trabalho a manutenção do funcionamento repetitivo do processo, que de acordo com Scotti e Ponomarev (2014) não é necessariamente o processo otimizado em termos de produção, custo, devendo apresentar boa aparência operacional (pouco ruído e respingos e cordões com boa aparência).

Na soldagem do aço, as atmosferas de proteção do GMAW são compostas de gases ativos e inertes, muitas vezes em misturas entre estes gases. As atmosferas de proteção são responsáveis por criar as condições de abertura do arco

e a proteção do cordão de solda. Neste trabalho o foco foi a influência da adição de um gás combustível, no caso o propileno (C_3H_6), nas atmosferas de proteção convencionais: Ar + 12% CO_2 , Ar + 25% CO_2 e CO_2 , em relação a estabilidade do processo GMAW, com transferência por curto circuito na soldagem do aço SAE 1020.

Os gases combustíveis não são relatados para uso como gás de proteção na soldagem GMAW assim como também não constam na norma AWS A5.32M/2011 (*Welding Consumables - Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes*) sobre os consumíveis gases e misturas para este processo.

A família de gases combustíveis pode ser considerada com potencial redutor devido os produtos originados das reações. É relatado nos trabalhos de Rodrigues (1994); Russel (1994); Linnert (2008); Khalaf *et al.*, (2011), que da quebra das ligações de C-C, C-H, e da recombinação destes átomos tem-se a liberação de C e H_2 . Nesta família o acetileno é identificado como o gás de maior poder calorífero, mas por ser muito reativo possui diversas restrições desde sua forma de armazenamento até a sua utilização em misturas. O acondicionamento deste gás em cilindros é feito sob forma de uma solução com acetona. Por estes motivos, foi descartado seu uso.

A utilização do H_2 como gás de proteção é orientado pela norma AWS A5.32/2011, que sugere sua utilização de forma secundária nas misturas e num percentual baixo. O uso é restringido a certas aplicações, como na soldagem do aço carbono, por ser um gás solúvel em certo grau em quase todos os metais, aumenta o risco de trincas a frio.

O gás escolhido, C_3H_6 tem a melhor relação H/C desta família, isto porque a cada molécula de H_2 que pode ser liberada também se tem a possibilidade de fornecer C (Rodrigues, 1994). Na poça de solda os íons resultantes das reações em alta temperatura podem se recombinar/associar liberando energia sob a forma de calor (Modenesi, 2009). Outra característica deste gás é o valor da pressão crítica que é inferior a do CO_2 . Devido a esta característica o ajuste da pressão do cilindro da mistura, entre os dois gases, não é suficiente para alterar o estado tornando o gás liquefeito. No cilindro da mistura os dois permanecem em estado gasoso, mesmo sob elevadas pressões.

Nos estudos (Tatagiba *et al.*, 2012; Scotti e Ponomarev, 2014; Suban e Tušek, 2001) o hidrogênio, considerado nesse trabalho como um produto da

dissociação/recombinação do C_3H_6 no arco, é identificado com potencial redutor. Apresenta possibilidade de reação com o oxigênio na poça de fusão, fato visualizado na diminuição da oxidação da superfície do metal de solda que se apresenta com aspecto mais brilhante.

1.1 Objetivo Geral

Neste trabalho, o objetivo geral é estudar o efeito da adição de um gás combustível, no caso o propileno, nas atmosferas de proteção convencionais no que se refere a estabilidade do processo na soldagem do aço SAE 1020 pelo GMAW com transferência por curto-circuito.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os limites percentuais de adição de propileno, para formulação de misturas de proteção, que resultam em soldas aceitáveis.
- Estabelecer ajustes dos parâmetros corrente e tensão para soldagem em atmosferas com adição de propileno.
- Comparar nas mesmas condições operacionais os cordões soldados nas atmosferas com adição de propileno com os nas atmosferas convencionais, visando identificar alterações na estabilidade do processo.
- Verificar o efeito da adição de propileno nas atmosferas de proteção no metal depositado, no que se refere a composição química, microestrutura e dureza.

1.3 Justificativas

Numa breve análise histórica da soldagem GMAW, até próximo da década de 1940 seu uso foi limitado devido à viabilidade econômica e comercial do gás de proteção. Os interesses oriundos da II Guerra Mundial e também os avanços das técnicas de produção de gases, que promoveram uma redução do seu custo, impulsionaram o uso do processo GMAW (Quites e Dutra, 1979). Nas últimas décadas, identifica-se uma grande contribuição ao processo devido à introdução de sistemas eletrônicos para controle nos equipamentos de soldagem, novas tecnologias de eletrônica de potência e/ou microprocessamento, máquinas inversoras compactas e a padronização indicada nas normas técnicas (Moyer, 2002; Dutra *et al.*, 2013).

A contribuição esperada com este trabalho é verificar a viabilidade da adição de um gás combustível, no caso o propileno (C_3H_6) por afetar a regularidade da transferência, como uma alternativa com menor custo se comparado a opção de aumento do gás inerte.

Na transferência metálica por curto-circuito a transferência de metal ocorre por tensão superficial, quando a gota toca o metal líquido da poça. Neste modo de transferência a poça de fusão é relativamente pequena, de rápida solidificação, indicada para soldagem de seções finas ou soldagens fora da posição plana. Devido as características citadas anteriormente este tipo de transferência é uma das mais estudadas (Souza *et al.*, 2011). A geração de respingos também é comum neste tipo de transferência, podendo diminuir a capacidade de produção devido à perda de material de adição, ou a necessidade de mão de obra e tempo para sua retirada. Nesse sentido também é significativo o estudo de novos gases para proteção em soldagem.

É destacado por Tatagiba *et al.*, (2012) que pouca evolução pode ser observada nas últimas décadas no estudo dos gases utilizados nas misturas para proteção da solda. Nota-se uma forte tendência para as atmosferas de proteção ser constituída de misturas ricas em gases inertes, com adições de elementos oxidantes, conforme normatizado pela AWS A5.32M. A soldagem em atmosfera CO_2 , devido principalmente ao seu baixo custo e facilidade operacional é muito empregada, embora seja associada a uma forte instabilidade do processo provocada por este gás.

Os gases combustíveis tais como acetileno, gás natural, propano e butano entre outros não constam na norma AWS A5.32M/2011 mas a sua identificação e seu potencial uso como aditivo às misturas convencionais podem conferir melhorias ao processo. Os conhecimentos produzidos advindos desta hipótese podem permitir a formulação de novas misturas gasosas para o processo GMAW, com o estabelecimento de novos padrões operacionais que tornem o processo mais produtivo, tornando-se viável para utilização na linha de produção.

O uso de H_2 como gás de proteção é orientado pela norma AWS A5.32/2011, que sugere sua utilização de forma secundária nas misturas e num percentual baixo. O uso é restringido a certas aplicações, como na soldagem do aço carbono, por ser um gás solúvel em certo grau em quase todos os metais, aumenta o risco de trincas a frio. Irving (1999) em seu trabalho sobre inovação em gases de proteção de soldagem no entanto relata que na Europa as misturas Ar/H_2 são amplamente utilizadas na soldagem de aço inoxidável austenítico, sendo o teor de H_2 entre 2% e 5%. A sua influência na solda consiste em elevar a temperatura do processo, fato que na soldagem automática resulta no aumento da velocidade de soldagem.

Em décadas de utilização do processo GMAW, são encontrados muitos estudos sistemáticos da soldagem com as atmosferas de proteção convencionais, no entanto, poucos são os relacionados aos fenômenos físicos e químicos. As causas atribuídas a essa escassez de informações são: i) que os fenômenos ocorridos no arco tem pequenas dimensões e o ambiente é altamente agressivo e ii) aos avanços relacionados aos equipamentos que possibilitaram um controle maior dos efeitos produzidos nos cordões soldados (Modenesi, 2009).

Conhecer a influência da adição de um gás combustível, no caso o propileno, nas reações em alta temperatura nas atmosferas de proteção, as interações com o metal de solda e os cordões gerados irão contribuir na expansão do conhecimento sobre esta técnica.

1.4 Ineditismo

Nas diversas pesquisas sobre a soldagem GMAW, tanto teóricas quanto práticas, a atmosfera de proteção é constituída de misturas entre gases inertes com gases oxidantes ou puros, de acordo com os materiais a serem soldados, em intervalos de composição muito semelhantes, estabelecidos na norma A5.32:2011.

O ineditismo deste trabalho está na identificação de uma nova família de gases, os combustíveis, a ser adicionados às misturas convencionais, e a possibilidade de trazer benefícios operacionais e metalúrgicos ao cordão de solda. Para tanto, foi selecionado o propileno entre os gases, que no arco elétrico, adicionado aos gases convencionais, pode influenciar no fluxo do plasma, fornecendo espécies de íons e elétrons. Até o momento do início do trabalho, não foram identificadas misturas de proteção na soldagem GMAW do aço carbono utilizando a adição de um gás combustível às misturas convencionais.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Arco Elétrico na Soldagem GMAW

O processo de soldagem GMAW, sigla do termo em inglês *Gas Metal Arc Welding*, em português pode ser expresso como soldagem a arco elétrico com proteção gasosa utilizando de forma contínua um arame consumível. É também conhecido como MIG/MAG devido a reatividade dos gases para proteção, MIG ou MAG, onde MIG (*Metal Inert Gas*) refere-se a utilização de um gás inerte, enquanto que MAG (*Metal Active Gas*) envolve o uso de um gás ativo.

A energia elétrica para o funcionamento deste processo é adquirida por uma fonte de energia, necessária para a formação do arco e conseqüentemente a fusão (Planckaert *et al.*, 2010). Scotti e Ponomarev (2014) denominam de arco voltaico a região existente entre a ponta de um eletrodo para soldagem e o metal base por onde passa grande quantidade de corrente, produzindo alta intensidade de calor e luz.

Modenesi (2009) em seu trabalho *Introdução a física do arco elétrico* mostra que os gases aquecidos no arco elétrico podem atingir temperaturas da ordem de 10^3 K, como por exemplo 6300 K para um arco com eletrodo revestido e maiores até 20000 K para o arco TIG, dependendo do tipo de gás presente na atmosfera do arco e da intensidade de corrente utilizada. No trabalho de Lancaster (1984) sobre a física da soldagem é mostrado que em processos a arco a densidade de energia pode variar na ordem de 10^6 até próximo de 10^8 W/m².

O seu equipamento básico inclui fonte de energia, cabos, tocha de soldagem, alimentador de arame e seu sistema de controle, bobina de arame, eletrodo, fonte de gás de proteção com regulador de vazão. De certa forma no processo GMAW ocorre uma auto regulação automática das características elétricas do arco e da taxa de deposição. Os controles manuais exigidos ao soldador são o posicionamento da tocha, orientação e velocidade de deslocamento (Vaydia, 2002).

O fluxo de corrente portanto vai ocorrer entre o eletrodo e a peça a ser soldada através de uma coluna de gás ionizado (denominado de plasma) (Modenesi e Avelar, 1999). Na figura 1 mostra-se um esquema deste processo de soldagem.

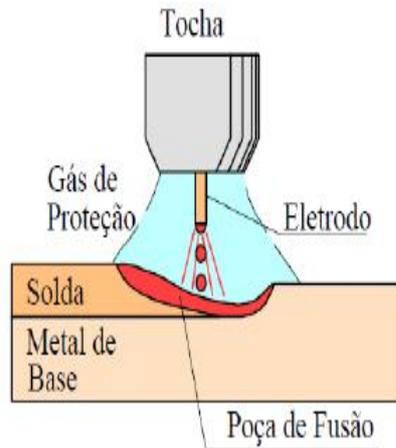


Figura 1: Esquema do processo de soldagem GMAW (Modenesi e Marques, 2000).

O processo GMAW tem alta flexibilidade, permitindo a soldagem de diferentes materiais e espessuras, e com um potencial considerável para automação e robotização (Pires *et al.*, 2007). Todos os metais comercialmente importantes, tais como aço carbono, aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio, níquel, podem ser soldados em todas as posições a partir da escolha do gás de proteção adequado, arame, e das variáveis de soldagem (Weglowski *et al.*, 2008).

Em geral, a reatividade natural da maioria dos elementos químicos, como Fe, C, N, os tornam favoráveis para reações com os componentes do ar. Durante a soldagem estes elementos além de reagir com os componentes do ar, podem se dissolver na zona fundida. No processo GMAW o gás de proteção vai dificultar a ocorrência de reações entre a zona fundida e a atmosfera (Kaçar e Kökemli, 2005).

No trabalho de Modenesi (2009) conceitua-se o arco como um condutor e ressalta-se que por ser gasoso é muito mais sensível as diferentes forças que atuam sobre ele. Em particular o campo magnético (B) induzido pela corrente (I), quando atua em torno de um condutor arco gera uma pressão (P_S) ao longo da seção (r) deste condutor que é dada por:

$$P_S = P_A + \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4\pi} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

onde:

P_A é a pressão atmosférica.

μ_0 é a permeabilidade magnética.

J é a densidade da corrente ($I/\pi R^2$).

R é o raio do condutor.

A diferença de pressão $P_S - P_A$ é máxima no centro do arco ($r = 0$). Os valores usuais de corrente na soldagem geram pressões na ordem de 0,0001% do limite de escoamento do cobre (Modenesi, 2009).

Silva *et al.*, (2007) em seu trabalho sobre os fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo GMAW por curto-circuito controlado fazem uma revisão de literatura e também mostram que o arco apresenta comportamento análogo a um condutor metálico, a queda de tensão que nele ocorre aumenta em proporção constante com a corrente de soldagem.

No seu sentido longitudinal o arco voltaico pode ser dividido em três regiões, de acordo com a geração de calor: região anódica (mais próxima do eletrodo consumível); coluna de plasma e região catódica (mais próxima da peça a ser soldada). Essas regiões podem ser observadas na figura 2. Em virtude da corrente passar em cada uma das regiões, nestas ocorre uma queda de tensão (Scotti e Ponomarev, 2014, Cayo e Alfaro, 2012).

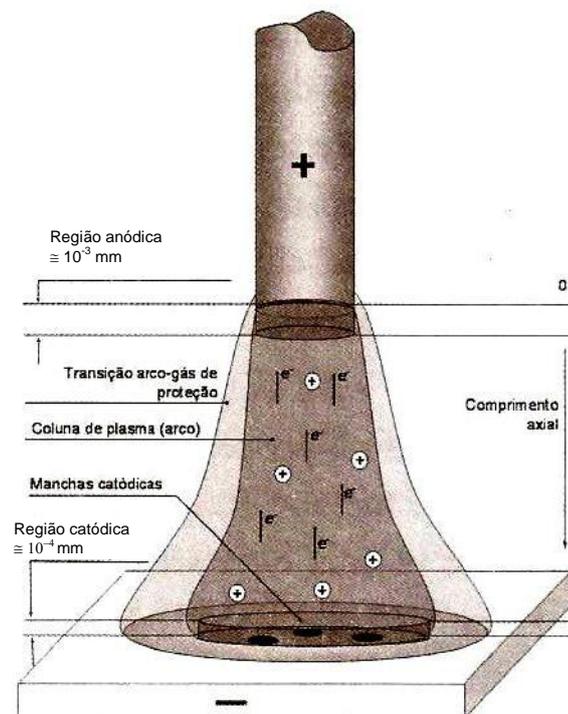


Figura 2: Regiões do arco elétrico (Scotti e Ponomarev, 2014).

Na soldagem com eletrodo consumível, como a GMAW, é aceito que os elétrons são emitidos de acordo com o fenômeno denominado de emissão catódica ou emissão por campo. O alto gradiente de tensão localizado, criado entre camadas de óxidos, formadas sobre a poça e arredores e o metal de base, propicia as condições necessárias para que os elétrons se agrupem e se acelerem em direção ao ânodo (Scotti e Ponomarev, 2014).

O arco apresenta duas características muito importantes: alta temperatura, de tal forma que o gás é ionizado para ser suficientemente condutor e velocidade de fluxo elevada. A temperatura elevada do arco é mantida pelo aquecimento ôhmico, que equilibra as perdas por condução, convecção e radiação (Lancaster, 1984).

Devido aos fenômenos físicos envolvidos no processo de soldagem GMAW são necessários conhecimentos de eletricidade, magnetismo, hidrostática, fluidos e dinâmicas de gás, para se obter uma melhor compreensão do processo e consequentemente se possa propor melhorias (Pires *et al.*, 2007).

2.1.1 Estabilidade do Arco

Os gases da atmosfera de proteção tem significativa influência na estabilidade do arco (Vaidya, 2002; Baixo, 1999; Den Ouden e Hermans, 1999). A estabilidade do arco é definida de várias formas, sendo a realizada por Scotti e Ponomarev (2014) em seu trabalho sobre a Soldagem MIG/MAG, como a capacidade do arco de manter ou reestabelecer rapidamente suas características de fonte de calor sob a ação de distúrbios durante a soldagem. Os autores destacam ainda que a avaliação da estabilidade do arco requer o uso de uma combinação de abordagens; o cálculo das estatísticas; análise de histogramas e das curvas de tensão e corrente de soldagem além de um amplo conhecimento.

A aquisição de sinais do arco elétrico envolve o uso de variados sistemas e técnicas de monitoramento durante as soldagens. Tendo destaque sensores capazes de medir variáveis como corrente, tensão, velocidade de alimentação, vazão do gás ao longo da soldagem e que possam ter interfaces com software e programas. De acordo com a IMC - Soldagem (2005), o Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem (SAP) é uma ferramenta útil para análises referentes a processos de soldagem. Na figura 3 é mostrado o painel de conexões do SAPV4

produzido pela IMC Soldagem; a interface do software e o acoplamento dele numa máquina de solda.

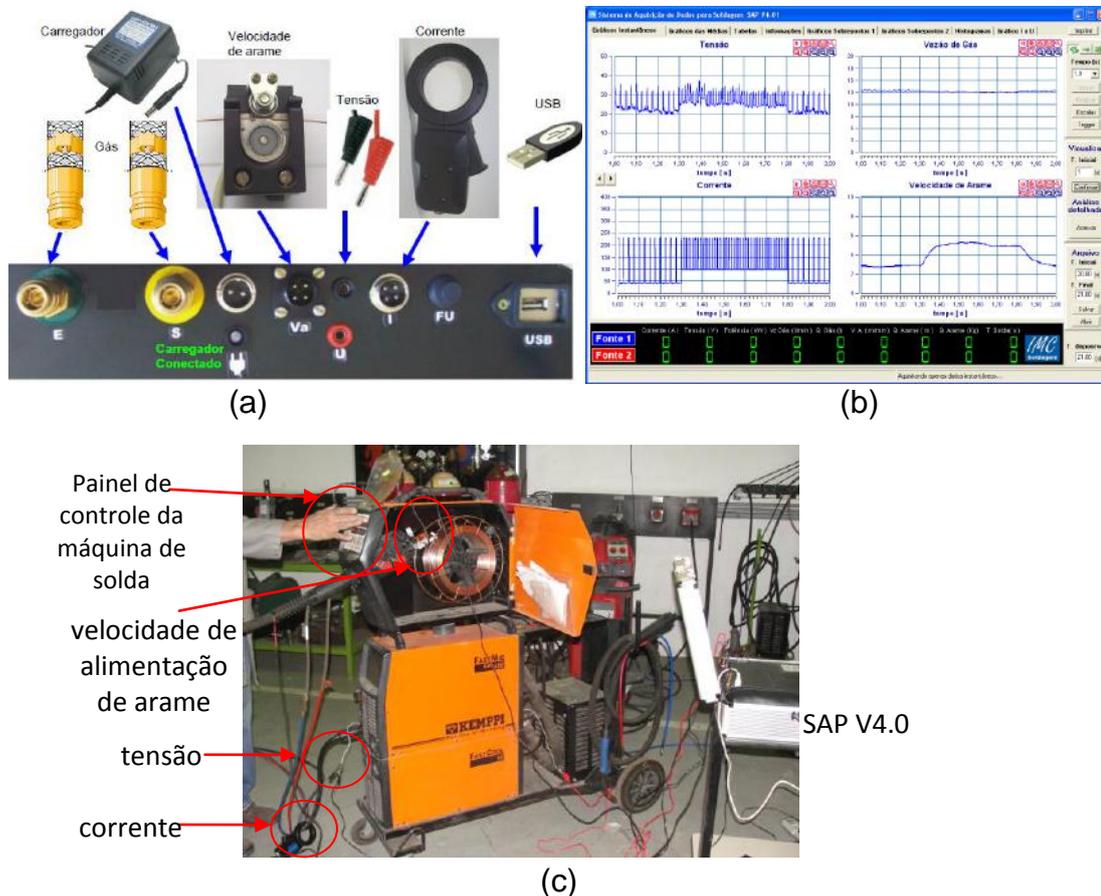


Figura 3: a) Painel de conexões do SAP V4.0, b) interface do software, c) SAP V4.0 acoplado a máquina de solda.

Kang e Rhee (2001) mostram em seu trabalho a utilização de análise estatística para estimar a quantidade de respingos formados, ressaltando a importância de análises quantitativas em conjunto com análises qualitativas. Os autores mostram um modelo otimizado de estimação da quantidade de respingos, quando se considera a extinção do arco em transferência metálica por curto-circuito através de regressão múltipla.

Em seu trabalho sobre a estabilidade do arco elétrico em soldagem, Luksa (2006) verificou que nem todos os sinais reagem a perturbações no arco da mesma forma e intensidade. Considerando ser melhor para a detecção uma análise de todos os sinais, embora não se possa utilizar todos os sinais simultaneamente.

No trabalho de Adolfsson *et al.*, 1999 sobre o monitoramento da qualidade do processo GMAW transferindo material por curto circuito são utilizados o cálculo dos desvios-padrão e índices tais como tempo de arco e de curto-circuito, taxa de curto-circuito, picos de corrente, média da corrente e tensão.

Modenesi e Nixon (1994) em seu trabalho sobre fenômenos de instabilidades no arco da soldagem GMAW mostram que a condição mais favorável para a soldagem ocorre quando o desvio padrão da frequência de curto-circuito atinge um valor mínimo. Shinoda *et al.*, (1989) estudando fenômenos no arco em transferências por curto circuito do GMAW investigou o tempo de arco e de curto circuito através de seus valores médios e de desvios padrão. Os resultados evidenciaram que os parâmetros de soldagem utilizados os quais resultavam em menores coeficientes de variação correspondiam a melhor estabilidade.

Para os autores Scotti e Ponomarev, (2014) a função que a análise estatística tem na soldagem a arco voltaico é comparada a de um microscópio óptico na metalurgia, tornando os elementos em exame mais visíveis e acessíveis para o entendimento. Nogueira *et al.*, (2015) explicam que na estatística descritiva algumas medidas que são normalmente usadas para descrever um conjunto de dados são medidas de tendência central e medidas de variabilidade ou dispersão. As medidas de tendência central que incluem a média nos dão uma ideia da concentração dos dados em torno de um valor. Entretanto há situações em que é necessário conhecer também suas características de espalhamento ou dispersão (medidas de variabilidade. Estas medidas de variabilidade incluem a variância, o desvio padrão e o desvio padrão relativo.

A média (\bar{x}) é definida como o somatório dos valores medidos de uma variável (x_i) dividida pelo número de medidas (n), pode ser obtida portanto através da equação:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

O desvio padrão (σ) é utilizado para identificar e comparar a variabilidade dos dados, é definido pela raiz quadrada dos desvios médios quadráticos da variável em estudo em relação ao valor médio:

$$\sigma = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 / (n - 1)]} \quad (3)$$

A dispersão dos valores em termos relativos é possível com a divisão do desvio padrão pelo valor médio da grandeza, denominado de coeficiente de variação (K_v). A equação para o cálculo deste índice é:

$$K_v = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}} \right) \cdot 100\% \quad (4)$$

No estudo do efeito do comportamento dinâmico da fonte de soldagem, na estabilidade do arco, de acordo com Scott e Ponomarev (2014), pode ser feito, por exemplo, a utilização das taxas de subida (di_s/dt) e descida (di_d/dt) da corrente. A partir de oscilogramas de corrente e tensão na soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito também podem ser estudados os índices básicos média do tempo de arco aberto (t_{ab}) e do tempo de curto circuito (t_{cc}). O tempo de arco aberto expressa a duração do crescimento da gota metálica fundida na ponta do eletrodo. O tempo de curto-circuito é o tempo de duração da transferência da gota fundida para a poça de fusão.

O desvio padrão do período de arco aberto (DPAA) e o desvio padrão dos períodos de curto circuito (DPCC) tendem a serem menores (mais estabilidade) em períodos menores (Baixo e Dutra, 1995; Menezes, 2013). Um exemplo de oscilogramas de valores instantâneos da corrente e tensão de soldagem plotados pelo software do SAPV4 do fabricante IMC Soldagem, com a identificação dos índices t_{ab} e t_{cc} , picos de corrente (I_{cc}) na curva, é mostrado na figura 4.

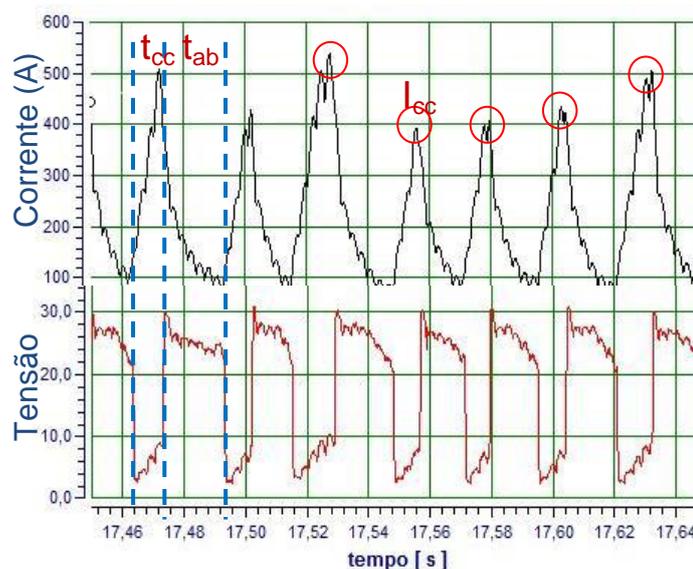


Figura 4: Oscilograma da I x U de soldagem identificando os índices básicos t_{ab} e t_{cc} na transferência por curto circuito.

A média do período de transferências (P), que é o somatório das $t_{ab} + t_{cc}$, também costuma ser utilizada como índice a ser levado em consideração devido sua dependência com o comportamento individual dos outros dois índices. Em geral maior estabilidade da transferência é atribuída a menores valores de P . Isso porque em períodos mais prolongados a corrente pode atingir níveis mais elevados, fato que poderia favorecer a geração de respingos (Baixo e Dutra, 1989).

Os picos máximos de corrente são governados pela di_d/dt controlada pelo efeito indutivo das máquinas de solda. Esse parâmetro é indicado no trabalho, como responsável, por fornecer as características de reestabelecimento do arco após cada curto circuito, por isso é destacado também sua dependência com o gás de proteção utilizado (Dutra, 2008).

No trabalho de Suban e Tušek, (2003) sobre métodos de determinação da estabilidade do arco, é destacado que um arco estável na soldagem com transferência por curto-circuito apresenta uma transferência metálica uniforme, o tempo de arco e o tempo de curto-circuito também uniformes, comprimento de arco constante e com geração de respingos minimizada.

Cayo e Alfaro (2012) em seu trabalho também sobre a estabilidade do arco, avaliaram a qualidade a partir do monitoramento das emissões acústicas do arco elétrico utilizando a lógica *fuzzy*. Verificaram que quando é alcançada uma alta estabilidade tem-se um número máximo de curtos-circuitos com um desvio padrão mínimo, pouca quantidade de respingos, assim como a transferência de massa mínima em cada curto-circuito.

No artigo de Grad *et al.*, (2004) discute-se sobre os dados adquiridos durante o processo de soldagem GMAW devido a emissão acústica do arco. O sinal acústico produzido contém informações sobre o comportamento da coluna do arco, poça de fusão e do modo de transferência metálica. Foi relatado que o primeiro estudo de ondas acústicas geradas durante a soldagem foi feito em 1967, no qual foi descoberto que a pressão do som produzido aumenta com o comprimento do arco e da corrente de soldagem. Em estudos posteriores foi verificado que a propagação do som tem influência do gás de proteção utilizado no processo de soldagem e afeta o comportamento da poça de fusão.

No trabalho de Lin *et al.*, (2001) foi mostrado que existe um problema com o método que se baseia em emissões acústicas porque estes sinais podem facilmente ser corrompidos por outros ruídos de fundo. Mostram com base em métodos ópticos

como fotografias e filmagens de alta velocidade, que também são obtidos dados relevantes.

De acordo com o trabalho de Alfaro (2012) são comuns as análises que se baseiam em um monitoramento infravermelho, acústico, e de vibrações na poça de soldagem. A espectroscopia é a ciência responsável pelo estudo da radiação emitida pelo arco. Este emite fótons, em um comprimento (frequência) de onda determinado, após a absorção de um pouco de energia. Átomos, íons e moléculas podem emitir fótons em comprimentos de onda diferentes, mas um comprimento de onda está relacionado apenas a um átomo ou íon ou molécula. Algumas linhas espectrais são escolhidas e a sua intensidade é medida por um sensor espectrômetro.

A emissão de infravermelho é originada devido a energia eletromagnética emitida pelo arco de soldagem. A intensidade desta emissão é governado pela Lei de Planck, que descreve o espectro da radiação.

Sofisticados modelos matemáticos foram desenvolvidos, incluindo os que tratam da geração do arco, o plasma, o arame de fusão, a formação de gotículas, a queda e impacto sobre o metal base. As técnicas matemáticas mais utilizadas pertencem à classe de métodos de Eüler. Estes métodos permitem que se leve em conta todos os fenômenos físicos sobre a forma da gotícula, as linhas de fluxo, etc. (Planckaert *et al.*, 2010).

No trabalho de Suban e Tušek, (2003) no entanto mostra-se que o estudo de ciclogramas é mais didático e menos complexo em comparação com os métodos de distribuição probabilística e/ou matemáticos.

A definição de um critério consensual para uma avaliação quantitativa segura da estabilidade do arco voltaico é de acordo com Braga (1997) dificultada pois vários autores têm estabelecido metodologias e critérios próprios, que muitas vezes dificultam a interpretação e/ou a comparação de seus resultados.

2.2 Transferência Metálica

A transferência de metal fundido para a poça de fusão é muito importante pois tem relação com diversos aspectos da soldagem. Modenesi (2009) destaca que a forma pela qual o metal fundido transfere-se da ponta da fonte de metal de adição

para a poça de fusão influencia em particular, o nível de respingos e fumos, a capacidade do processo ser utilizado fora da posição plana, o formato do cordão e, enfim, a estabilidade e o desempenho operacional do processo.

O modo de transferência depende de diversos fatores como: os parâmetros elétricos do arco; o diâmetro e composição do metal de adição; tipo e composição do meio de proteção; comprimento energizado do eletrodo; pressão atmosférica, entre outros (Fan e Kovacevic, 1998).

A transferência de calor para a peça acontece principalmente através de três meios: o primeiro acontece na conexão arco-peça (o calor gerado na mancha anódica ou catódica), onde o calor é transferido por condução para a chapa formando a poça de fusão. O segundo meio da transferência do calor para a chapa representa o calor carregado por gotas em transferência do eletrodo para a poça de fusão. Uma parcela do calor carregado pelas gotas é perdida para o ambiente devido aos respingos e à evaporação metálica. O terceiro meio envolve a energia da coluna de plasma que é entregue para a chapa. A radiação da coluna de plasma é um meio de transferir o calor para a chapa, especialmente fora da conexão arco-peça (devido à alta temperatura dentro dessa região, o calor é transferido por condução, como é visto acima). Entretanto, o jato de plasma também carrega energia do plasma (entalpia) para a chapa através da advecção forçada (movimento forçado do gás) e difusão. A parcela significativa de calor da coluna de plasma vai para a chapa. Isso acontece por advecção, uma vez que a camada correspondente do gás aquecido não ionizado em torno também carregue a energia (entalpia) (Scotti *et al.*, 2012a).

Percebe-se portanto que a queda do metal fundido a partir do arame envolve interações complexas entre diferentes fenômenos físicos como efeitos eletromagnéticos, efeitos térmicos e da dinâmica de fluidos (Planckaert *et al.*, 2010).

Scotti e Ponomarev (2014) explicam que a gota desde o início de seu crescimento na ponta do arame-eletrodo, fica submetida à ação de uma série de forças que podem atuar favoravelmente ou não ao seu destacamento. O mecanismo de destacamento é alterado pela corrente de soldagem. Entre as teorias existentes, o modelo conhecido como Equilíbrio de Forças Estáticas consiste na explicação de que a gota é transferida quando o somatório das forças de destacamento superam o somatório das forças de retenção. No caso, as principais forças que agem sobre a gota são: força gravitacional; força eletromagnética; força devido à tensão superficial

do metal fundido; força de arraste dos gases; e força de vaporização. A partir de determinada corrente de transição o mecanismo que deve atuar sobre a transferência das gotas deve ser o denominado de Instabilidade Pinch. Os autores no entanto ressaltam que nenhum dos dois modelos são comprovados na prática, tanto por poder existir mais forças desconhecidas atuando concorrentemente como pela própria deficiência em se modelar o comportamento real de cada uma das forças identificadas.

Diversas técnicas são relatadas para o estudo da transferência de metal. Modenesi (2009) agrupa as técnicas mais comuns em três categorias: métodos mecânicos; fotográficos; através da medição de efeitos secundários.

O estudo das formas de transferência do metal de solda pode ser correlacionado com a estabilidade do processo e de acordo com Silva *et al.*, (2008) se tem estabilidade quando se obtém uma solda com regularidade na transferência metálica, independente do tipo, e homogeneidade da mesma ao longo do cordão, produzindo um mínimo de respingos, e também geometricamente homogênea em toda a extensão do cordão.

O metal se transfere, segundo o Instituto Internacional de Soldagem (*International Institute of Welding - IIW*), por duas formas principais: transferência por curto-circuito e transferência por vôo livre. Esta última inclui várias subformas de transferência.

As classificações mostradas por Scotti *et al.*, (2012), são uma síntese tendo em vista o estudo das modernas técnicas laboratoriais, especificamente a filmagem de alta velocidade sincronizada com os parâmetros de aquisição de soldagem. São propostas três grandes classes de transferência: Natural, Controlada e Combinada, apresentadas na figura 5. As classes, natural e combinada se caracterizam pela ocorrência sem controle da fonte, enquanto as transferências da classe controlada são obtidas por imposição de controle feita pela fonte. A classe combinada se caracteriza pela ocorrência de dois tipos de transferência periódicas, ou seja, ocorre um tipo de transferência depois outro e volta ao primeiro tipo, formando um ciclo. Neste trabalho serão enfocadas as formas de transferência natural do tipo curto-circuito, globular e goticular também conhecida como spray.

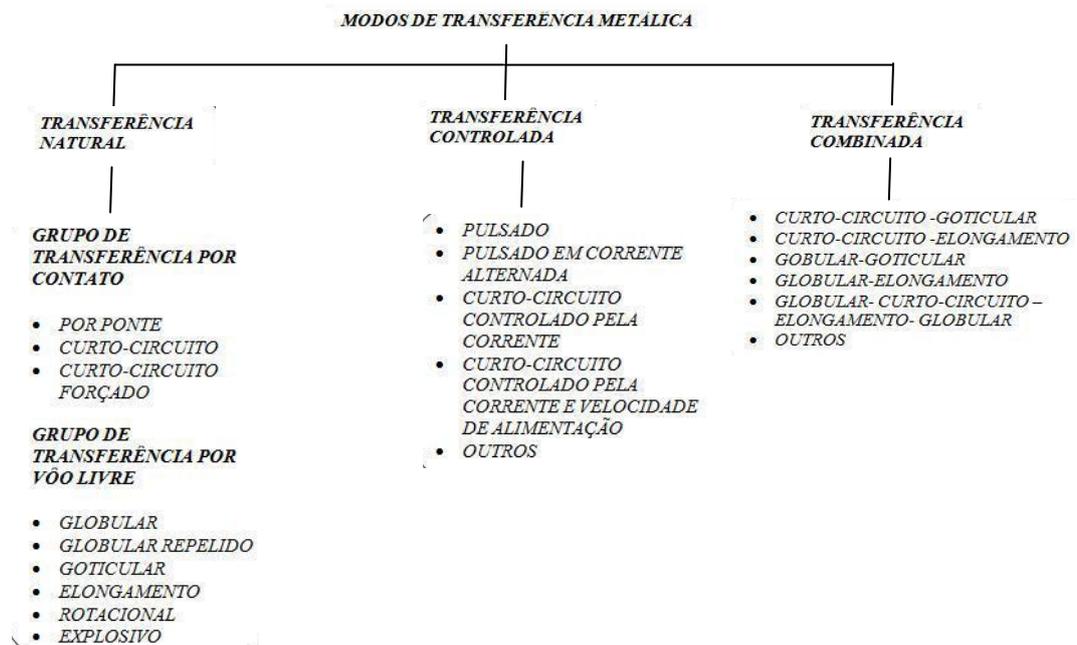


Figura 5: Classificações dos modos de transferência metálica (Scotti *et al.*, 2012).

2.2.1 Transferência por Curto-Circuito

Na transferência por curto-circuito, devido a baixa tensão tem-se um arco de comprimento curto, que possibilita o contato com a poça de fusão do metal líquido na ponta do eletrodo antes que ocorra o destacamento. A ponta do eletrodo, formada por esta gota de metal fundido, atinge periodicamente a poça de fusão, caracterizando o curto-circuito. Durante o curto-circuito a corrente tende a aumentar rapidamente, causando uma maior fusão do eletrodo por efeito joule e, ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. Periodicamente o curto-circuito é interrompido. A forma com que pode ocorrer esta interrupção, ou seja, mais ou menos abrupta, leva a vaporização de parte do material entre o eletrodo e a poça de fusão e a formação de respingos (Modenesi, 2009; Costa *et al.*, 2009; Scotti e Ponomarev, 2008).

No início da transferência do metal por curto circuito o destacamento da gota fundida resiste a força de tensão superficial. No entanto quando a gota atinge a poça de fusão a força muda a sua direção. A força eletromagnética é proveniente do fluxo e rotação do meio que conduz corrente elétrica (Luksa, 2006). De acordo com o

trabalho de Kim (1993) a gota se desprende do eletrodo quando o balanço das forças que atuam nesta apresentem uma resultante que a afaste.

A transferência para a peça então ocorre pela ação da gravidade e pela força de arrasto exercida pelo fluxo do plasma com alta velocidade. Simultaneamente a massa da gota se mistura com a peça de trabalho formando a poça de fusão. Isso se repete até que a soldagem termine. A poça de fusão solidifica-se formando um cordão de solda (Rao *et al.*, 2010; Hu e Tsai, 2007).

Na figura 6 tem-se um esquema do oscilograma de corrente e tensão associado com o período de transferência por curto-circuito. O arco existe no período A-B, o curto-circuito ocorre em C e, no instante D, tem-se a reignição do arco.

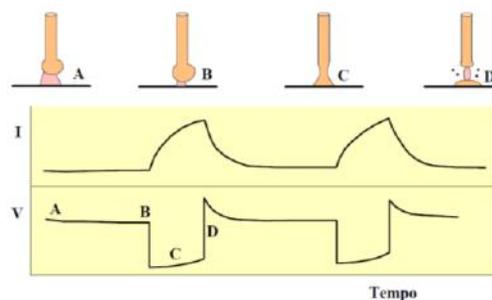


Figura 6: Esquema da transferência por curto-circuito (Modenesi, 2009).

A transferência de material não ocorre pelo arco elétrico. O curto-circuito ocorre em níveis relativamente baixos de corrente e tensão, possibilitando assim a soldagem de pequenas espessuras. No modo curto-circuito é possível a soldagem em todas as posições (Quites, 2002).

A transferência metálica é considerada um processo muito dinâmico pois os curtos-circuitos ocorrem de certa forma aleatoriamente levando a uma dispersão considerável dos valores do intervalo de tempo entre a ocorrência de dois curtos-circuitos subsequentes principalmente em condições menos estáveis (Modenesi, 2009). Um grande problema que ocorre durante a transferência em condições de instabilidade é a formação de respingos. Hermans e Den Ouden (1999) atribuí três causas distintas para instabilidade: i) curtos-circuitos instantâneos: o eletrodo toca a poça de fusão num período de tempo muito curto, sem a transferência devida do metal; ii) falhas no processo de reignição do arco; iii) variações indevidas na taxa de alimentação do arame.

2.2.2 Transferência Globular

Quites (2002), mostra que este tipo de transferência ocorre em níveis de tensão mais elevados do que no curto-circuito. As gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão principalmente pela ação da força gravitacional, limitando que a soldagem ocorra na posição plana. O diâmetro das gotas tende a ser maior que o diâmetro do arame. Como problemas pode-se ter falta de fusão, falta de penetração. Não é um modo muito utilizado nas indústrias.

Scotti e Ponomarev (2014) mostram que durante a formação da gota, esta permanece no eletrodo devido principalmente à ação combinada das forças de tensão superficial e de vaporização. Quando o volume da gota se torna grande o suficiente, o seu peso e, em menor escala, a força eletromagnética e a força de arraste superam as forças contrárias à transferência causando o destacamento. Este comportamento justifica a baixa taxa de transferência, enquanto a baixa corrente impede de alcançar uma alta taxa de deposição do arame. O oscilograma típico deste modo de transferência é mostrado na figura 7.

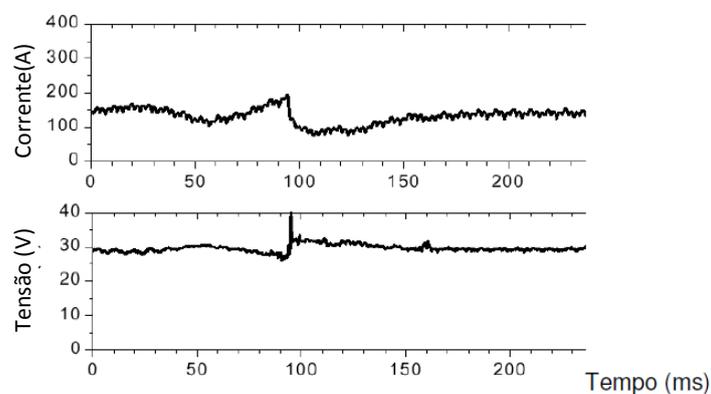


Figura 7: Oscilograma da transferência globular (Modenesi, 2009).

2.2.3 Transferência por Spray

Em seu trabalho sobre o fenômeno da instabilidade do arco na soldagem GMAW, Modenesi e Nixon (1994) mostram que para ocorrer a transferência por spray é preciso que a corrente ultrapasse a chamada corrente de transição fazendo com que o diâmetro das gotas de metal que se transferem para a peça diminua.

Neste modo o diâmetro das gotas é menor do que o diâmetro do arame (Costa *et al.*, 2009). A corrente de transição depende de inúmeros fatores, particularmente, da composição e do diâmetro do eletrodo além do seu comprimento energizado e do tipo de gás de proteção (Kim e Eagar, 1993).

As gotas são pequenas e destacadas da ponta do arame devido às forças magnéticas que atuam nas direções radiais e axiais. O cordão tem um bom acabamento e praticamente não há respingos. Devido aos altos níveis de corrente, a soldagem se torna difícil nas posições vertical e sobre cabeça (Modenesi e Nixon, 1994).

A transferência spray apresenta excelentes características operacionais, porém é limitada para usos na soldagem de juntas de maior espessura e na posição plana. Para outras condições, trabalha-se, usualmente, com transferência por curto-circuito (Modenesi, 2009).

2.3 Estabilidade do Processo GMAW com Transferência Metálica por Curto-Circuito

Nos estudos referentes a estabilidade (Baixo e Dutra, 1989; Cook *et al.*, 1992; Farias e Dutra, 1993; Baixo e Dutra, 1995; Cook *et al.*, 1997; Hermans e Ouden, 1999; Adolfsson *et al.*, 1999; Kang, 2003; Suban e Tušek, 2003; Chu *et al.*, 2004; Luckasa, 2006; Scotti e Ponomarev, 2014; Dutra, 2009; Liskevych, 2010; Rezende *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2011; Cayo e Alfaro, 2012; Tatagiba, 2015) seja do processo, do arco ou da transferência, são encontradas análises estatísticas que, de forma geral, indicam os valores representativos da amplitude dos sinais, da periodicidade dos eventos, facilitando a realização de correlações entre os fatores de entrada e os sinais de saída.

A extinção e reignição do arco na transferência por curto-circuito a tornam inerentemente instável (Choi e Kim, 1998). A natureza randômica dos curtos-circuitos é facilmente identificada pelas formas irregulares das curvas de tensão e de corrente de soldagem, refletidas pelas instabilidades tanto do período de curto-circuito em si como dos tempos de curto-circuito e de arco aberto ou entre curtos-circuitos. Uma maneira de analisar um processo aleatório é examinar os histogramas de seus parâmetros (Scotti e Ponomarev, 2014).

Dutra (2008) em seu trabalho sobre MIG/MAG, relacionado a transferência metálica por curto-circuito, fontes de soldagem e gases de proteção, relata ter desenvolvido em sua tese de doutorado ferramentas de cunho científico, sendo uma destas os histogramas.

No trabalho de Dutra (1989) é considerado que os oscilogramas são mostrados de forma estatística, através do agrupamento em intervalos (faixas) das grandezas: picos de corrente, períodos de transferência, tempos de arco e tempos de curto-circuito nos histogramas. Este fato possibilita o estudo da repetitividade dos fenômenos da transferência metálica. Sendo constatado que o desvio padrão destas grandezas representa um bom indicativo da estabilidade do processo e, por conseguinte pode ser usado na qualificação de consumíveis, de fontes de energia e para a qualificação de procedimentos adequados de soldagem. Na figura 8.a um histograma dos períodos de transferência de um arco com características de menor desvio padrão (DPPT), maior di_d/dt se comparado ao 8.b, por isso podendo ser considerado de maior repetitividade.

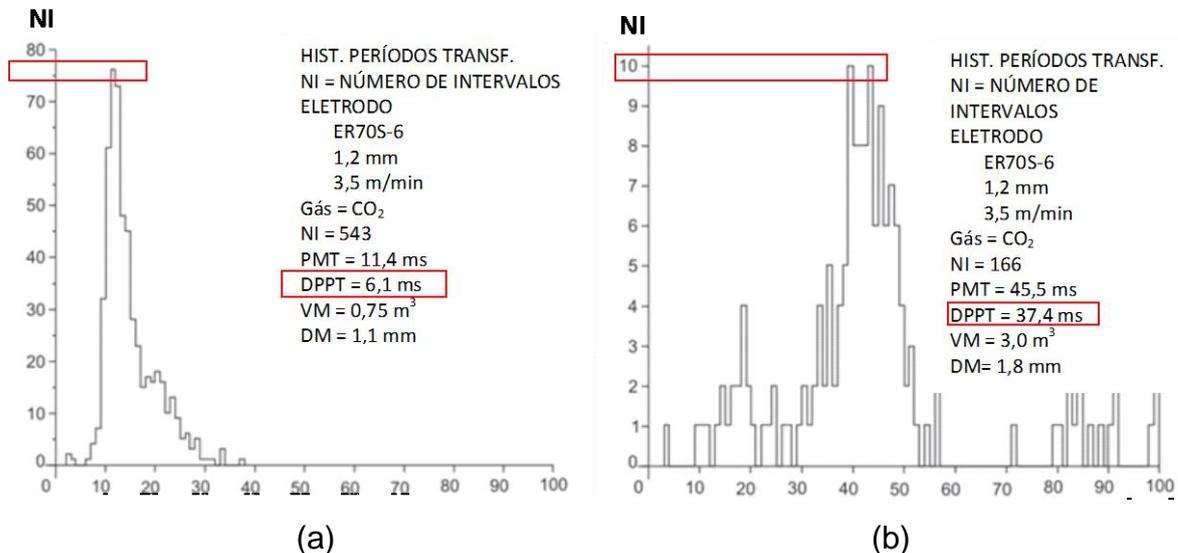


Figura 8: Histogramas: a) períodos transferência com taxa de decrescimento da corrente de 44 A/ms; b) períodos transferência com taxa de decrescimento da corrente de 20 A/ms (Adaptado - Dutra, 2008).

Suban e Tušek (2003) mostram em sua metodologia de análise da estabilidade do arco, utilizando ciclogramas, que por este critério a estabilidade é atribuída aos que tem concentração e regularidade da curva. Na parte superior tem-

se as curvas sobre o período de arco e na parte inferior as curvas referentes aos períodos de curto circuito. Os ciclogramas são gráficos plotados que apresentam as variáveis corrente e tensão uma em função da outra.

No trabalho de Roca *et al.*, (2005) foi estudado um algoritmo para o cálculo exato das áreas dos ciclogramas, referidos como laços, de corrente e tensão. A associação dos índices de regularidade com os resultados da análise de dispersão das áreas dos laços, mostraram que os maiores valores de desvios das áreas dos laços, estavam nos processos mais instáveis. Foi demonstrado que o algoritmo proposto se constituiu em um método válido para a análise de estabilidade.

Pessoa *et al.*, (2010) consideram que os parâmetros importantes, vistos nestes diagramas, são a área (potência), a dispersão e a variação da corrente e tensão. Se a dispersão da tensão aumenta (patamar vertical), a variação do comprimento do arco aumenta e a instabilidade pode aumentar. Se ocorrem aumentos no patamar horizontal, a variação da taxa de fusão tende a aumentar, o que pode significar instabilidade. Consideram os ciclogramas eficientes para relacionar a estabilidade do arco com o formato do cordão. No trabalho de Silva *et al.*, (2007); Dobignes (2008); Wiktorowicz e Melton (2013) estes gráficos também são mostrados associados a outros métodos de avaliação da estabilidade. Na figura 9 pode ser visto um ciclograma plotado pelo software do SAPV4 IMC soldagem.

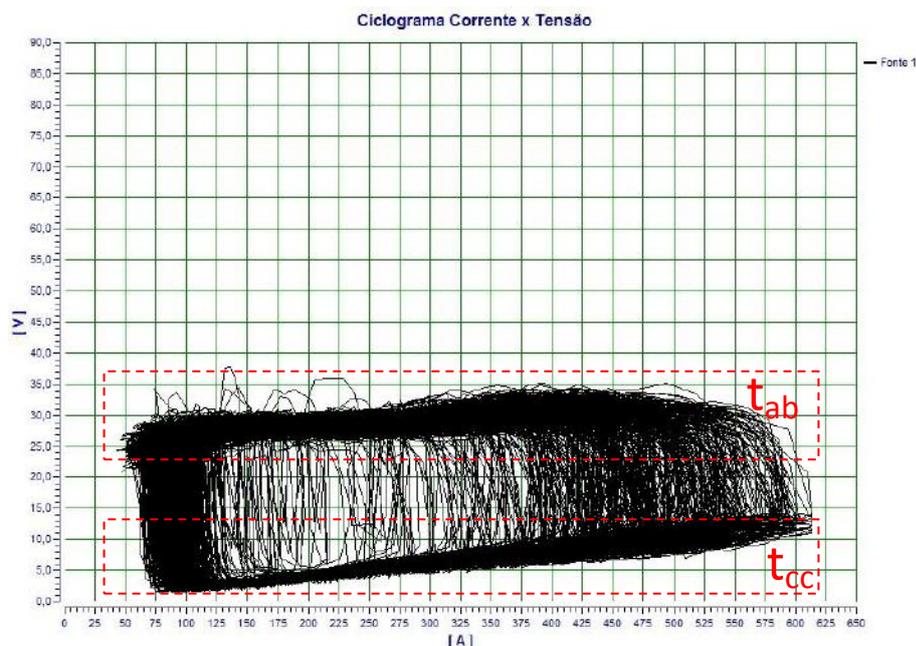


Figura 9: Ciclograma.

Scotti e Ponomarev (2014) mostram que a estabilidade do processo GMAW sofre a influência de muitas variáveis, podendo ser alcançada quando se garante simultaneamente a estabilidade do arco e da transferência metálica.

Rezende *et al.*, (2011) em seu trabalho sobre um critério para determinar a tensão em soldagem MIG/MAG por curto circuito mostra através do levantamento de vários trabalhos científicos que na maioria é utilizado a regularidade dos elementos dos oscilogramas ou a relação entre sentimentos do soldador e alguns modelos para estimar o comportamento operacional do processo de soldagem MIG/MAG, mas nenhum deles considera estabilidade do arco e regularidade da transferência metálica em conjunto. Os autores destacam que a estabilidade do processo MIG/MAG pode ser avaliada por três fatores: estabilidade do arco, regularidade da transferência metálica e comportamento operacional, os quais se relacionam de forma muito próxima.

É considerado como postulado que a melhor condição de soldagem por curto-circuito ocorre quando proporciona uma maior estabilidade de transferência e com a transferência dominada pela tensão superficial. Baseando-se neste postulado foi criado o "Critério LAPROSOLDA para Quantificar a Estabilidade de Transferência por Curto-Circuito no Processo de Soldagem MIG/MAG", que tem duas premissas: i) que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto (regularidade da transferência) e ii) de que cada gota ao se destacar tenha um volume apropriado para haver a ação da tensão superficial (Scotti e Ponomarev, 2014).

A regularidade da transferência é quantificada pelo Índice Vilarinho de Regularidade de Transferência (IV_{cc}). A expressão para o cálculo é mostrada na equação 5, definida como a soma de duas razões: desvio padrão da média do tempo de curto circuito (DPCC) com a média do tempo de curto circuito (t_{cc}); desvio padrão da média do tempo de arco aberto (DPAA) com a média do tempo de arco aberto (t_{ab}). Quanto menores os valores maior regularidade é atribuída a transferência metálica (Liskévych e Scotti, 2010; Rezende *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2011, Scotti e Ponomarev, 2014).

$$IV_{cc} = \frac{DPCC}{t_{cc}} + \frac{DPAA}{t_{ab}} \quad (5)$$

O volume adequado de cada gota (Φ_g) responsável por garantir uma transferência dominada pela tensão superficial é dependente dos materiais do

arame-eletrodo, gás de proteção e posição de soldagem. A determinação de uma faixa de frequência de transferência (só de curtos com transferência) estimada a partir do cálculo envolvendo a velocidade de alimentação, diâmetro e densidade do arame, para atingir o tamanho de gota para uma transferência adequada, de acordo com a equação 6. Pode-se supor que uma gota não deva crescer muito antes de se destacar, por outro lado, precisa ter um volume mínimo por isso devem ser estimadas frequências máximas (F_{cc-max}) e mínimas (F_{cc-min}) esperadas (Rezende *et al.*, 2011).

$$F_{cc} = \frac{v_{alim} \cdot (d)^2}{(\Phi_g)^3} \quad (6)$$

Silva *et al.*, (2008) definem que há estabilidade no processo quando o resultado do mesmo é uma solda com regularidade na transferência metálica, independente do tipo, homogeneidade ao longo do cordão, produção de um mínimo de respingos, os quais não comprometem o conforto do soldador e nem acarretam tempos secundários de retrabalho, produzindo uma poça de solda também geometricamente homogênea em toda a extensão do cordão.

De acordo com Alfaro (2012) ocorrendo um defeito durante a soldagem, ele pode ser refletido nos fenômenos físicos envolvidos: campo magnético, campo elétrico, temperatura, pressão sonora, emissão de radiação e outros. Assim, se um sensor monitorar um destes fenômenos, é possível construir um sistema para monitorar a qualidade da solda.

Em trabalhos como os de Cook *et al.*, (1992), Adolfsson *et al.*, (1999) e Wu *et al.*, (2001) a máxima estabilidade do processo para garantir a melhor qualidade da solda acontece quando na transferência metálica ocorre o máximo número de curtos-circuitos por segundo, um desvio padrão mínimo dos tempos dos curtos-circuitos, a transferência de massa é mínima durante o curto-circuito e quando o nível dos respingos é mínimo.

Lordachescu e Quintino, (2008) verificaram que os valores de corrente e tensão, permitem supor uma relação entre esses parâmetros, devido as forças que atuam na transferência metálica.

Costa *et al.*, (2009) utilizando diferentes técnicas de estudo como análise de oscilogramas de corrente e tensão de soldagem, medições da intensidade da luz emitida pelo arco com filmagens de alta velocidade, pode observar que durante o período de instabilidade do arco ocorrem alterações no modo de transferência

metálica, alterações no formato e no comprimento do arco elétrico, na tensão e corrente, gerando também alterações na forma como ocorre a interação com o metal base.

2.4 Fundamentação Teórica da Formulação de Atmosferas de Proteção

Analisando-se experimentos que requerem o uso de gases ou misturas de gases verifica-se que são necessárias quatro variáveis para definir a condição física, ou estado, de um gás: temperatura (T); pressão (P); volume (V); quantidade de gás, que geralmente é expressa em quantidade de matéria (n) (Mahan e Myers, 2005).

Na estequiometria das reações identifica-se a massa molecular das substâncias somando-se as massas atômicas dos elementos, isto é a massa de um mol. Na linguagem química o mol sempre pode se correlacionar com: quantidade, massa, volume (Chang, 2007).

As equações que expressam as relações entre T, P, V e n são conhecidas como Leis dos Gases. Estudando-se a Lei de Gay-Lussac e Avogadro é estabelecida a relação entre quantidade e volume. A hipótese de Avogadro diz que volumes iguais de gases à mesma temperatura e pressão contêm números iguais de moléculas, isto é, mesmo que se tenha gases diferentes se estes estiverem nas mesmas condições de estado, eles terão o mesmo número de moléculas (Camel e Filgueiras, 2013).

Destaca-se a Teoria Cinética que abrange um amplo estudo da estrutura interna dos gases e estabelece a relação entre os fenômenos devido a alteração destas variáveis. A fundamentação teórica é principalmente na Lei dos gases. Mas os desdobramentos desse conhecimento também são muito importantes como a Lei de Avogadro, a equação de Clayperon e as Leis de Dalton e Amagat. Devido as condições de soldagem: baixa pressão e alta temperatura, os gases tem esse comportamento semelhante ao gás perfeito, estando em equilíbrio termodinâmico e obedecendo essas leis (Metghalchi e Keck, 2011; Silva, 2015).

Nas tabelas de gases comerciais é comum encontrar a densidade relativa do gás. Esta densidade é obtida quando comparamos as densidades de dois gases,

isto é, quando dividimos a densidade do gás, na mesma condição normal de temperatura e pressão - CNTP.

Em Russell (1994) é mostrado que a densidade relativa é um número adimensional. Por exemplo, na mistura de dois gases A e B, pode-se afirmar que a densidade de A em relação a B é:

$$d_{A,B} = \frac{M_A}{M_B} \quad (7)$$

A densidade relativa dos gases é encontrada em comparação da massa A do gás com a do ar atmosférico, que tem massa molar média de 28,96 g/mol. Neste caso tem-se:

$$d_{A,Ar} = \frac{M_A}{M_{Ar}} \quad (8)$$

A pressão parcial de um gás em uma mistura é a pressão que o gás exerceria se ele estivesse sozinho. Nas misturas gasosas, considerando-as formadas por gases ideais, utiliza-se a equação de Clapeyron:

$$P_{total} \cdot V = n_{total} \cdot R \cdot T \quad (9)$$

A pressão parcial de um gás A da mistura é obtida deixando-se somente as partículas do gás A nesse volume V e nessa temperatura T. Assim o cálculo da pressão parcial para esse gás segue a equação:

$$P_A \cdot V = n_A \cdot R \cdot T \quad (10)$$

Dividindo-se a expressão 10 por 9 é obtido a pressão parcial de cada gás utilizando-se a fração molar (X_A):

$$\frac{P_A}{P_{total}} = \frac{n_A}{n_{total}} = X_A \quad (11)$$

ou seja:

$$P_A = P_{total} \cdot X_A \quad (12)$$

em misturas com k tipos de gases podem ser somadas as pressões parciais, obtendo-se:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_k = \sum_{i=1}^k P_i = P_{total} \cdot X_1 + X_2 + \dots + X_k = P_{total} \cdot \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_k}{n_{total}} \quad (13)$$

sabendo-se que $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n_{total}$, como visto em frações parciais, é a soma em mols de todas as partículas, temos:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_k = \sum_{i=1}^k P_i = P_{total} \quad (14)$$

conclui-se que a soma das pressões parciais dos gases leva a pressão em que se encontra a mistura gasosa (representada como P_{total}). Esse resultado é conhecido como Lei de Dalton para pressões parciais.

O conceito de volume parcial é definido de maneira análoga à pressão parcial, é o volume que um gás A de uma mistura gasosa ocuparia caso ele estivesse sozinho, nas mesmas condições da mistura, podemos escrever:

$$P \cdot V_{total} = n_{total} \cdot R \cdot T \quad (15)$$

e para o volume parcial do gás A, a expressão é:

$$P \cdot V_a = n_a \cdot R \cdot T \quad (16)$$

dividindo a equação 16 por 15:

$$\frac{V_a}{V_{total}} = \frac{n_a}{n_{total}} = X_A \quad (17)$$

conclui-se que o volume parcial do gás A pode ser calculado por:

$$V_a = V_{total} \cdot X_A \quad (18)$$

A obtenção da percentagem em massa ou volumétrica do gás também pode ser obtida como mostrado nas equações:

$$X_A = \frac{m_A}{m_{total}} \times 100 (\%) \quad \text{e} \quad X_A = \frac{V_A}{V_{total}} \times 100 (\%) \quad (19)$$

Levando-se em conta as diversas possibilidades de cálculos estequiométricos torna-se considerável observar que a razão entre os elementos constituintes das moléculas é importante.

2.4.1 Propriedades dos Gases

Devido a tantas misturas diferentes de gás de proteção e tantos fabricantes, a Sociedade Americana de Soldagem (*American Welding Society - AWS*) para regular a qualidade e a consistência dos gases utilizados para proteção em soldagem, publicou a norma AWS A5.32M/A5.32:2011 referente aos gases e misturas de gás para soldagem por fusão e processos afins. Nesta constam especificações sobre as características básicas e reatividade durante a soldagem.

As propriedades físico-químicas dos gases, que afetam a coluna de plasma são o potencial de ionização, a densidade relativa, potencial de oxidação, condutividade térmica e a capacidade térmica.

Na tabela 1 são mostradas as propriedades dos gases de interesse neste trabalho, devido sua relação com a proteção em soldagem.

Tabela 1: Propriedades dos gases.

Propriedades	Ar	CO ₂	C ₃ H ₆	H ₂	CO	He	O ₂	N ₂
Peso Molecular ^a (g/mol)	39,95	44,01	42,08	2,02	28,01	4,00	32,00	28,01
Temperatura Crítica ^b (K)	150,6	304,5	364,9	32,9	132,9	5,25	154,7	123,5
Pressão Crítica ^b (kgf/cm ² .abs)	49,61	75,34	43,55	13,23	35,69	2,34	51,82	34,62
Volume Específico ^b (m ³ /kg)	0,61	0,55	0,57	11,97	0,86	6,04	0,76	0,86
Densidade relativa ^b (kg/m ³)	1,38	1,52	1,42	0,07	0,97	0,14	1,10	0,97
Densidade ^a (kg/m ³)	1,69	1,87	1,81	0,08	1,18	0,17	1,35	1,18
Condutividade Térmica ^a (mW/m.K)	16,48	14,67	14,67	172,58	24,74	146,20	24,35	24,00
Calor específico molar (v) ^a (kJ/mol.K)	0,0125	0,0289	0,0563	0,0205	0,0208	0,0125	0,0211	0,0208
Potencial de Ionização ^c (eV)	15,76 ^d	13,79 ^d	9,73 ^d	13,59	14,01 ^d	24,59	13,61	14,53

a) *Air Liquide* (2014): Densidade nas condições de 1 atm e 288,15 K; Condutividade térmica nas condições de 1 atm e 273,15 K; Calor específico molar, a volume constante, nas condições de 1 atm e 298,15 K.

b) *White Martins* (2010): Densidade relativa nas condições de 1 atm e 294,15 K.

c) *The National Institute of Standards and Technology* (2014).

d) *Good For Gas Company* (2013).

O potencial de ionização segundo Linnert, (1994), é a quantidade de energia expressa em elétron-volt (eV) necessária para deslocar um elétron de um átomo de um gás, tornando-o um íon. A facilidade do gás em se tornar um íon é importante para a ignição e a estabilidade do arco. Gases com baixo potencial de ionização como o Ar se comparado ao He, possuem maior facilidade na abertura do arco. Para um dado comprimento de arco e mesmo valor de corrente de soldagem, a tensão é maior para gases com maior potencial.

Outra propriedade também importante é a densidade relativa em relação ao meio ambiente. Por definição densidade é massa por unidade de volume. Quando o gás é mais denso do que o ar atmosférico tem maior facilidade de proteger a solda realizada abaixo do bocal da tocha, isto é, na posição plana. Na posição sobrecabeça quanto menos denso maior a eficiência de deposição (Scotti e Ponomarev, 2008). O ar atmosférico tem uma densidade de $1,225 \text{ kg/m}^3$ nas condições de pressão 1 atm e temperatura de 288,15 K (Air Liquide, 2015). Suban e Tušek (2001) demonstram que a densidade do gás de proteção influencia na eficiência do arco em proteger a gota de deposição contra a oxidação devido ao ar atmosférico. Os gases mais densos do que o ar necessitam de menor vazão do que os menos densos para que se assegure uma proteção eficiente da poça de fusão. Ar e o CO_2 são gases de grande densidade se comparados ao ar atmosférico e promovem uma proteção bastante eficiente na posição plana. O H_2 e o He são 10 a 20 vezes menos densos que o Ar, fato que pode permitir a ocorrência de turbulência no fluxo do gás de proteção.

O potencial de oxidação dos gases pode ser explicado como o potencial que determinado gás tem de promover a oxidação. A natureza oxidante do gás de proteção afeta o desempenho e as propriedades do arco e da solda resultante. No trabalho de Costa *et al.*, (2007) é destacado que a presença de O_2 no gás de proteção favorece a estabilidade do arco devido a favorecerem o fenômeno de emissão catódica.

De acordo com Jonsson *et al.*, (1995), Lyttle e Stapon (1990) a presença de um elemento oxidante suaviza o perfil do cordão de solda, reduz seu ângulo de molhamento e a altura do reforço, melhora a penetração e reduz a formação de mordeduras.

A condutividade térmica é a capacidade que o gás tem de transferência do calor gerado com a abertura do arco para o metal de base. Essa propriedade varia

em função da temperatura. Os gases que apresentam elevada condutividade térmica transferem mais calor para o metal de base, influenciando, assim, tanto características geométricas quanto microestruturais do cordão (Moreira, 2008).

A condução maior de calor na direção radial, faz com que a coluna de plasma se expanda, dando um formato de sino a esta, e tendendo também à reduzir a altura da coluna de plasma. O gradiente de temperatura entre a região central e periférica da coluna de plasma é menor, se comparado com um gás de proteção com baixa condutividade térmica (Lyttle e Stapon, 1990; Suban e Tušek, 2001; Vaidya, 2002).

De acordo com Suban e Tušek (2001) uma grande condutividade térmica em relação ao argônio produz um arco em que a energia é mais uniformemente dispersa, por exemplo, a adição de certa quantidade de hélio no gás de proteção aumenta a condutividade térmica e a energia de ionização. Esse aumento da voltagem do arco produz grande energia no arco e contribui para o fluxo do gás, resultando em uma penetração mais profunda.

Na figura 10 é mostrado o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura, de alguns gases. Destaca-se que 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 $3273\text{ }^\circ\text{C}$. A entalpia do H_2 é maior do que a do argônio na maioria das temperaturas (Suban e Tušek, 2001).

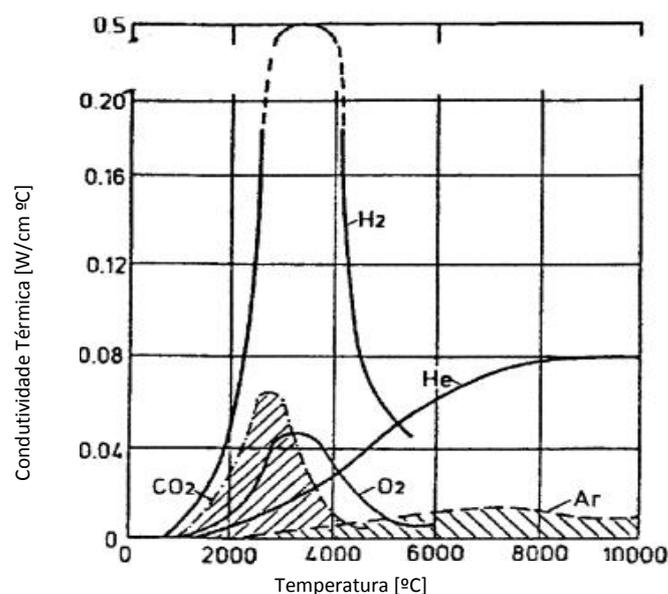


Figura 10: Variação da condutividade térmica em função da temperatura (Tušek e Suban, 2000).

A capacidade térmica quando expressa por unidade de massa/mol recebe o nome de calor específico mássico ou molar. O valor encontrado para esta propriedade depende das condições em que são feitas as medições (Nussenzveig, 2002). No arco pode variar consideravelmente, resumidamente, no processo de aquecimento, a capacidade térmica representa a quantidade de calor absorvida e a condutividade térmica com que taxa este calor é transmitido. Essa é também uma justificativa do comportamento do CO₂ no arco que embora tenha condutividade térmica próxima do Ar em algumas faixas de temperatura apresenta um calor específico maior que o dobro do Ar. A alta capacidade térmica das moléculas de CO₂ fazem transferir mais energia térmica para o metal base quando comparado ao Ar puro. O uso de misturas de gases de proteção proporciona uma série de vantagens em relação ao uso de gases puros. Entre estas tem-se a transferência metálica mais eficaz, melhor molhamento, maior estabilidade do arco elétrico, uma maior penetração, aumento da velocidade de soldagem e menor formação de respingos (Cayo e Alfaro, 2012).

2.4.2 Atmosferas de Proteção Convencionais

Nas últimas décadas em soldagem vem sendo utilizado como gás de proteção o argônio (Ar), o dióxido de carbono (CO₂) e o hélio (He), que são usados puros ou misturados entre si. Em alguns casos, pequenas quantidades de oxigênio (O₂) são misturadas aos anteriores. Adições de elementos redutores como o hidrogênio (H₂) e o nitrogênio (N₂) são citadas na soldagem de aços inoxidáveis e outras aplicações específicas como as compiladas no trabalho de Tatagiba *et al.*, (2012).

Em uma atmosfera de argônio (Ar), o arco elétrico é estabelecido facilmente com um formato cilíndrico. Por causa da sua densidade não é propenso a turbulência, e tem um forte efeito de limpeza na superfície do cátodo. O Ar tem uma baixa capacidade térmica e seu potencial de ionização é baixo em comparação com o He, o que contribui para formação de um arco estreito que resulta em uma soldagem com maior profundidade (Cayo e Alfaro, 2012).

A presença de uma quantidade limitada de oxigênio no gás de proteção, que envolve o arco, melhora a capacidade de molhamento do metal de solda. O oxigênio

pode ser adicionado, aos gases inertes habitualmente utilizados para a proteção, sob a forma de oxigênio gasoso ou como dióxido de carbono. Uma grande proporção de oxigênio ou de dióxido de carbono é indesejável devido à possibilidade de oxidação dos elementos essenciais do aço nas peças de trabalho. Também pode promover a formação de uma quantidade excessiva de escória (Lesnewich *et al.*, 1970).

Lyttle e Stapon (1990) em seu trabalho verificaram que misturas de gases com alto teor de oxigênio, tais como CO₂ puro, ou mesmo Argônio com elevados teores de CO₂, O₂, ou ambos, possibilitam a transferência de menores quantidades de elementos de liga contidos no eletrodo para o cordão de solda. A perda destes elementos de liga: Si, Mn, Al e Ti por oxidação pode afetar as propriedades mecânicas do cordão.

O gás de proteção representa apenas 3% do custo da soldagem no caso de aços carbono. De acordo com Irving (1999) se colocar os principais tipos de gases aplicados na soldagem por ordem crescente de custo tem-se a sequência: CO₂, Ar e He.

A classificação quanto a reatividade dos gases durante a soldagem consiste de: inertes e gases ativos. Os ativos ainda podem ser classificados como: oxidantes, redutores e de baixa reatividade. O Ar e o He são considerados inertes, CO₂ e O₂ oxidantes, H₂ redutor e o N₂ de baixa reatividade (AWS A5.32M, 2011).

A classificação de acordo com a reatividade leva em consideração o potencial de oxidação dos gases ou misturas gasosas. Em seu trabalho sobre os fundamentos metalúrgicos do gás de proteção em soldagem, Novozhilov (1988) destaca a interação dessa propriedade do gás com a poça de fusão já que a define como a capacidade do gás de proteção oxidar um metal durante a soldagem, podendo levar a diminuição de elementos de liga na solda.

Os inertes não reagem com outros elementos para formar compostos, enquanto os redutores quando combinados com oxigênio retardam a formação de óxido na superfície da camada final da solda, resultando em um cordão de solda limpo e de melhor aparência (Tušek e Suban, 2000).

Um resumo com as principais misturas de gases de proteção utilizadas para soldagem a arco elétrico foi feito no trabalho de Tatagiba *et al.*, (2012), sendo mostrado na tabela 2. Nesta pode-se observar também os resultados encontrados na soldagem de diferentes materiais.

Tabela 2: Formulações de gás de proteção para soldagem a arco elétrico (adaptado Tatagiba *et al.*, 2012).

Ano	Gás de Proteção	Resultados
1960	Ar/He 1-20%CO ₂ /CO	Material: aço carbono (<0,35%C). Obtenção de um cordão de solda muito liso e uniforme. Particularmente quando é adicionado CO ₂ a mistura.
1964	Ar e/ou He. 20-70% CO ₂ /CO 1-15% O ₂	Material: aço carbono. Formação de uma poça de solda que associa a boa penetração fornecida pelo gás CO ₂ com a boa largura de cordão fornecida pelo Ar.
1970	He Ar 40-60%Ar 1-15%CO ₂ 1-15%CO ₂ 60-80%He	Material: aço carbono. Possibilidade de realizar soldas em todas as posições, obtendo adequadas propriedades de resistência mecânica e tenacidade.
1986	65-95% He 1,75-2,25%CO ₂ 0,25- 1%O ₂	Material: aço carbono. Solda livre de escória e com uma superfície mais limpa.
1989	He 3-8%CO ₂ 30-40%Ar	Material: aço carbono. Melhorou a deposição sobre o metal base em virtude da transferência metálica ser por spray.
1990	Ar 0,5-1,25%CO ₂ 30-40%He	Material: aço carbono, aço inoxidável, metais não ferrosos. Produz uma solda com aparência superior a obtida com outras misturas, com aspecto liso e com pouca ou nenhuma oxidação, sem instabilidade do arco. A taxa de transferência metálica é alta.
1991	20-65%Ar 30%CO ₂ 5-20%He	Material: aço carbono. Com esta composição do gás de proteção é possível o uso de correntes de até 1000 A, mantendo boa densidade e um formato satisfatório do cordão. Com essas misturas houve baixa formação de respingos e liberação de fumos. A melhor aparência da solda é obtida com correntes maiores que 600 A.
1996	Ar 2-20%O ₂	Material: aço carbono, aço inoxidável. A adição de O ₂ aumentou a taxa de transferência metálica, que variou de acordo com a corrente utilizada, promovendo a formação de um cordão de solda de melhor qualidade.
2001	96%Ar 3%CO ₂ 1%O ₂	Material: aço carbono, aço inoxidável. Obtem-se transferência metálica por curto-circuito, por spray entre outras. Com esta composição não ocorre alteração significativa da química do metal de solda.
2002	Ar Ar CO ₂ O ₂	Material: aço carbono, aço inoxidável. O arco de soldagem apresenta-se bastante instável. A solda não tem molhabilidade adequada e são produzidas descontinuidades. Material: aço carbono, aço inoxidável. O ₂ melhora a fluidez, molhamento e penetração do cordão de solda. Além da estabilização do arco, as adições progressivas contribuem para a perda de elementos de liga através do arco. Adições de CO ₂ aumentaram as emissões de fumos de soldagem.
2009	97.5% Ar 82% Ar 2.5% CO ₂ 18% CO ₂ 90% Ar 75% Ar 10% CO ₂ 25% CO ₂	Material: aço carbono. Com o aumento da porcentagem de CO ₂ no gás de proteção verificou-se o aumento na penetração da solda e a diminuição na quantidade de inclusões.

2009	Ar 1%O ₂	Material: aço carbono. Em condições com baixa corrente o arco elétrico é instável, com transferência metálica globular e grande formação de respingos. Nos períodos de alta corrente, a transferência por spray foi estável, ocorrendo baixa formação de respingos e um arco mais longo. O processo foi instável e após cerca de 3 a 6 s, tornou-se estável. Esta transição foi caracterizada por um aumento no comprimento do arco (de 4 mm) e da corrente (entre 50-100 A).
1988.	71-83%Ar 16%-25% He 1-4%CO ₂	Material: aço inoxidável, aços de baixa liga, ligas a base de Ni e metais não ferrosos. Utilizando-se gás de proteção com esta composição a taxa de deposição de metal é aumentada, com a entrada de energia reduzida, na soldagem por arco pulsado, em operações de soldagem fora de posição.
1992.	Ar 0,1-0,9%CO ₂ 5%-12% He	Material: Super ligas a base de Ni, Co. Capacidade de soldar com uma grande variedade de modos de transferência metálica com a estabilidade do arco excelente, perfil do cordão e a aparência adequada. As características do arco são mantidas de forma a não produzir oxidação excessiva do metal de solda.
2002	Ar 0,01-1,80%O ₂ 20-98,2% He	Material: Al e suas ligas. Transferência por spray, sem corrente pulsada. Proporciona uma elevada produtividade devido a velocidades de soldagem de 110 cm/min em corrente contínua e 105 cm/min em corrente alternada. As juntas soldadas apresentam um baixo nível de inclusões de alumina, e adequadas propriedades mecânicas.
2007	Ar 6-10%CO ₂ 6-10%He	Material: aço revestido, galvanizado e aço aluminizado. Obteve-se transferência metálica por curto-circuito e por spray. Pode ser aplicada com posição de soldagem horizontal ou plana. Promoveu menor quantidade de respingos e porosidade. Cordão de solda com melhor aparência.
2010	Ar 20-30%CO ₂ 12-15%O ₂	Material: aço galvanizado. Na soldagem de ângulo, de uma folha, usando essa composição do gás de proteção é possível obter uma velocidade de soldagem de até 125 cm/min.

Percebe-se que em geral são utilizadas misturas de gases para proteção em soldagem, isto por que cada componente pode colaborar de uma forma. Segundo Scotti e Ponomarev (2008) a eficiência do gás ou da mistura é verificada pela proteção da poça de fusão e das gotas em transferência, de reações com elementos nocivos presentes no meio ambiente. Também procura destacar a influência do comportamento reativo do gás com o metal de solda.

O argônio (Ar) é um gás incolor, inodoro, insípido, monoatômico e é inerte. Isto significa que ele não reage com outros elementos para formar compostos. Ele é obtido da atmosfera. É facilmente separado como um sub-produto, durante a produção em larga escala do oxigênio e nitrogênio puro, estando disponível a um custo modesto (Tušek e Suban, 2000).

O hélio (He) está em uma pequena proporção na atmosfera (uma parte em 186.000) e em certos minerais, no Canadá e nos Estados Unidos existe um gás natural extraído de lugares profundos sendo a maior fonte do hélio, por isso seu custo elevado. A separação do hélio do gás natural é realizada pela liquefação e fracionamento, sendo que a pureza deste para ser aplicado na soldagem é de 99,99% (Linnert, 1994).

O dióxido de carbono (CO₂) é o único gás oxidante usado sem mistura de gás inerte para proteção de soldas no processo de soldagem GMAW. A grande penetração na junta soldada e o baixo custo são as características que estimulam o uso do CO₂ como gás de proteção (Wainer *et al.*, 1992). O que encoraja seu uso pela indústria é o fato de ser um gás que proporciona boa velocidade de soldagem, boa penetração, boa resistência e um custo baixo em relação aos gases inertes, porém, o cordão de solda tem um aspecto mais grosseiro, devido principalmente ao alto índice de respingos, fator este que pode ser fonte de problemas quando se necessita de um bom aspecto final da peça a ser soldada. Quando o cordão precisa ser não somente resistente, mas também de bom aspecto visual, é recomendado usar o CO₂ como gás de proteção adicionado ao argônio na proporção de 75% de argônio e 25% CO₂ (Rathwell, 2001).

A alta capacidade térmica do CO₂ e sua energia liberada na recombinação fazem transferir mais energia para o metal de base, quando comparado com o Ar puro, tendo um comportamento similar ao He em relação à geometria do cordão. Também demanda uma maior tensão para manter o arco aberto, regulando o equipamento para passar a soldar com proteção mais rica em CO₂, evita-se que um arco muito curto se estabeleça (muito respingo, falta de penetração, etc.). Seu potencial de oxidação favorece a estabilidade da raiz do arco, mas de forma antagônica parece aumentar a tensão superficial metal líquido/meio ambiente (Scotti e Ponomarev, 2008).

Adições de oxigênio (O₂) podem ser feitas para aumentar a temperatura do arco pois proporcionam maior resistividade elétrica ao mesmo. O alto potencial de oxidação no entanto pode ser uma desvantagem devido a queima de elementos de liga do metal de solda, afetando suas propriedades mecânicas e resultando na formação de uma camada oxidada, que é firmemente aderida à superfície do cordão (Quintino e Pires, 1996).

O nitrogênio (N) é considerado de baixa reatividade por fornecer uma proteção não oxidante. Porém quando aplicado para aços, misturas de argônio com 4 a 6% de nitrogênio resultam em porosidade no cordão de solda. O nitrogênio é obtido em grande quantidade, a um custo relativamente baixo, como um subproduto da produção do oxigênio puro (Linnert, 1994).

2.4.3 Propileno

O gás popularmente conhecido como propileno é um gás combustível, classificado como hidrocarboneto e nomenclatura propeno de acordo com a União Internacional de Química Pura e Aplicada (*International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC*) e fórmula molecular C_3H_6 .

É um gás incolor, inflamável em pressão e temperatura ambientes, flutua e ferve na água; produz nuvem de vapor invisível e inflamável, odor ligeiramente adocicado. É acondicionado na forma liquefeita. Os usos do propeno incluem mistura para gasolina, copolímero de polipropileno, síntese de isopropanol, trímeros e tetrâmeros para detergentes, óxido de propileno, glicerina, em pequena escala como gás para oxi-corte. Seu nome comercial para uso em oxi-corte varia de acordo com a empresa que faz a comercialização: Starflame GC-2 (White Martins) e Thermolene (AGA - The Linde Gas Group) (Mahan e Myers, 2005; Air Liquide, 2014; White Martins, 2010).

O propileno não é tóxico. Exposições rotineiras a níveis toleráveis são relatadas como não nocivas a saúde. Não é cancerígeno. Os efeitos de queimadura pelo frio são: mudança da cor de pele para cinza ou branco, possivelmente seguida de feridas. O propileno é definido como um asfixiante simples pois seu principal risco é a capacidade do gás em deslocar o oxigênio do ar, principalmente em locais confinados. Nesses locais em altas concentrações podem levar a: perda da coordenação ou tontura, pressão na parte frontal da cabeça, formigamento na língua e na ponta dos dedos, enfraquecimento da fala levando à incapacidade de emitir sons, rápida redução dos movimentos, consciência reduzida e perda de tato. Possui efeito narcótico causando relaxamento do sistema nervoso central (AGA - The Linde Gas Group, 2014).

2.5 Comportamento dos Gases de Proteção nas Altas Temperaturas

Na soldagem a fusão das partes a serem trabalhadas requerem uma fonte calorífica que forneça a energia necessária para o aumento da temperatura até a mudança de estado físico e manutenção do material em estado líquido, para que a união se realize.

A soldagem GMAW como citado anteriormente vem passando por inovações que otimizam o processo de fusão, cuja fonte de energia calorífica é um arco voltaico num plasma. Neste sentido, o entendimento dos fenômenos envolvidos é necessário, quando o intuito é obter um grau satisfatório de conhecimento sobre os mesmos, como é o caso deste trabalho.

De acordo com Silva *et al.*, (2007) apesar de inúmeros estudos acerca do arco elétrico no campo da Física, não existe uma congruência quanto a aspectos de sua formação, seu comportamento, características térmicas e influência no processo, principalmente no que tange à soldagem com eletrodo consumível.

Na maioria dos trabalhos publicados são consideradas temperaturas um pouco acima da temperatura ambiente devido às dificuldades experimentais para medir as interações na superfície molecular exposta a temperaturas elevadas.

No trabalho de Anghel *et al.*, (2004) sobre as interações do CO_(g) com superfícies sólidas em altas temperaturas é destacado que enquanto métodos experimentais são esperados para medir diretamente os fenômenos químicos e físicos em temperaturas elevadas, os cálculos teóricos sobre o tema vem sendo realizados.

Os gases não conduzem eletricidade em condições normais, entretanto nas condições de soldagem: alta temperatura, baixíssima pressão, submetida a campo elétrico de altíssima intensidade, podem se ionizar passando ao quarto estado da matéria: plasma. Neste estado passam a ser condutores e num arco de soldagem com atmosfera protetora o plasma é composto a partir de gases de proteção e vapores metálicos do arame-eletrodo e metal base (Scotti e Ponomarev, 2008).

De acordo com Modenesi (2009) essas condições do arco elétrico possibilitam a ocorrência de choques violentos entre os componentes iniciando e mantendo a ionização. Na fase gasosa a taxa de formação de íons a partir de uma

molécula pode ocorrer quando dois interagirem e formarem complexos durante as colisões (Ausloos *et al.*, 1975).

Devido a existência das regiões anódicas e catódicas, elétrons partem do cátodo (-) para o ânodo (+). A corrente elétrica ao longo da coluna do arco é devido a condução feita por elétrons (Scotti e Ponomarev, 2008). Estes são gerados na região catódica, embora esta tenha um volume desprezível se comparada com a coluna de plasma (Modenesi, 2009).

A região catódica tem grande importância no processo GMAW, pois é dela que emergem os elétrons que seguem pelo arco. Os elétrons são emitidos devido ao fenômeno denominado de emissão catódica ou emissão por campo.

A emissão por campo resulta do alto gradiente de tensão criado geralmente entre uma camada de óxido sobre a superfície do metal e o metal de base, propiciando as condições necessárias para que elétrons se agrupem e se acelerem em direção ao anodo. Isto ocorre mesmo com baixa tensão aplicada entre o eletrodo e a chapa. Com esta aceleração os elétrons removem a camada de óxido localmente (quebrando-a/ou fundindo-a), atravessam-na nestes pontos e seguem pela coluna de plasma até o anodo (figura 11).

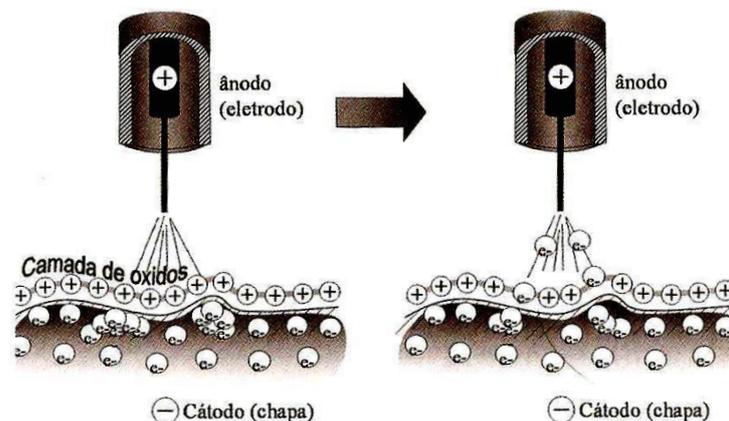


Figura 11: Esquema da interação dos elétrons com a camada de óxido (Scotti e Ponomarev, 2008).

Silva *et al.*, (2007) mostram que a capacidade de emissão de elétrons pelo cátodo, geralmente constituído pela peça no processo GMAW, depende da função de trabalho e da temperatura do mesmo. Por isso existem diferentes teorias sobre os mecanismos de liberação de elétrons para o arco e aquecimento do eletrodo.

No trabalho de Bottin (2000) sobre as propriedades termodinâmicas para misturas de gases submetidas a altas temperaturas, é mostrado que as propriedades termodinâmicas dos gases devem ser corretamente calculadas por causa da sua influência sobre o fluxo de solda.

Avillez e Silva (1994) em seu trabalho sobre a termodinâmica dos sistemas metal-gás mostram que o estudo da termodinâmica clássica se aplica para este estudo pela fundamentação de três leis: a do princípio de conservação de energia, a que estabelece as condições de espontaneidade de uma reação (liberação de calor) e a que define a entropia como zero para uma substância no estado de equilíbrio termodinâmico. Mostra ainda que a condição básica de equilíbrio termodinâmico é a de minimização da energia de Gibbs total.

As relações entre a energia livre de Gibbs e atividade química, quantidades termodinâmicas parciais como potencial químico, diagramas de equilíbrio são fontes disponíveis de dados termodinâmicos específicos para sistemas metal-gás.

Rodrigues (1994), em seu trabalho sobre os fundamentos da reação metal-gás, mostra que em relação ao estado molecular do gás podem ser distinguidos termodinamicamente dois tipos de sistemas: um no qual a absorção é um processo exotérmico, liberando ΔH° como entalpia de reação e outro endotérmico ($\Delta H^\circ > 0$). Independentemente dos valores de entalpia o gás na forma atômica, dissociado, estará sempre a níveis energéticos acima do estado absorvido. O controle do equilíbrio das reações através das razões entre as pressões parciais dos gases determinará a concentração dos elementos dissolvidos no metal.

Hu e Tsai (2007) em seu trabalho sobre transferência de calor e massa na região do arco mostram que o plasma é um local de equilíbrio termodinâmico, onde os elétrons e as partículas pesadas estão em temperaturas iguais. Nesta perspectiva, as propriedades do plasma, incluindo a entalpia, o calor específico, densidade, viscosidade, condutividade térmica e elétrica, são determinadas a partir de uma composição de equilíbrio.

No trabalho de Helgeson *et al.*, (1998) sobre o cálculo das propriedades termodinâmicas dos gases em altas temperaturas e pressões são feitas correlações entre o estabelecido por um padrão e nas condições de interesse da seguinte forma: se o padrão molar de energia livre de Gibbs e entalpia de formação (ΔG° e ΔH° , respectivamente) de uma dada espécie em uma dada pressão (P) e temperatura (T) são definidos por:

$$\Delta G^\circ \equiv \Delta G^\circ_f + (G^\circ_{P,T} - G^\circ_{PrTr}) \quad (20)$$

$$\Delta H^\circ \equiv \Delta H^\circ_f + (H^\circ_{P,T} - H^\circ_{PrTr}) \quad (21)$$

onde ΔG°_f e ΔH°_f referem-se ao padrão molar de energia livre de Gibbs e entalpia de formação da espécie a partir dos elementos na sua forma estável a uma pressão de referência (Pr) e temperatura (Tr). $G^\circ_{P,T} - G^\circ_{PrTr}$ e $H^\circ_{P,T} - H^\circ_{PrTr}$ representam as diferenças no padrão energia livre de Gibbs e entalpia das espécies à pressão e temperatura de interesse, e os na pressão e temperatura de referência.

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

Modenesi (2009) mostra que tanto a dissociação (gases moleculares) como a ionização de um gás são reações endotérmicas, ocorrem com absorção de energia no seu sentido direto e com liberação de energia no sentido inverso quando ocorre neutralização ou associação. A presença no arco de gases que podem se dissociar ou que apresentem uma elevada condutividade térmica causa um aumento da tensão do arco devido a um maior campo elétrico na coluna do arco.

As reações entre o metal e o gás envolve etapas como transporte de átomos, íons na fase gasosa, processos de adsorção e desorção, reações de penetração através das interfaces, transformações de moléculas sobre a superfície do metal. A adsorção pode ser física quando o gás torna-se preso à superfície sólida na sua forma original ou adsorção química quando ocorre dissociação, forma molecular (Rodrigues, 1994).

Segundo Modenesi, (2009) em temperaturas mais elevadas, a energia vibracional das moléculas poliatômicas aumenta e pode ser suficiente para causar a sua ruptura, denominada de dissociação. A temperaturas ainda mais elevadas, um elétron nas camadas mais externas dos átomos pode ser expulso, levando a ionização dos átomos e moléculas.

A entalpia dos gases de proteção, cujo calor se transfere para a peça a soldar por convecção forçada (jato incidindo sobre o metal de base) representa a energia que o gás tem de absorver para passar do estado gasoso à temperatura ambiente para o estado plasmático (Scotti e Ponomarev, 2008).

Este processo também é explicado por Fisher (2011), de forma que gases moleculares ionizados tem íons livres. Estes íons podem voltar a recombinar-se para dar origem ao composto original e liberar energia adicional sob a forma de calor.

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

Os aços estruturais iniciam o processo de vaporização antes de chegar a uma temperatura suficientemente elevada, que permitiria a liberação de elétrons, por isso a camada óxida presente na superfície do cátodo é importante, pois exige menos energia para a liberação de elétrons do que o metal. Em geral a camada de óxido é que alimenta o arco com os elétrons necessários a sua subsistência (Silva *et al.*, 2007).

De acordo com Norrish (1974), os átomos de oxigênio promovem maiores níveis de emissão de elétrons em ligas ferrosas, estabilizando o arco e consequentemente regulando a transferência de metal.

Na poça de fusão os átomos de não metais como O, N, S e C que compõem moléculas de gás mais complexas como hidrocarbonetos podem em geral ser absorvidos liberando H na forma molecular $H_{2(g)}$ (Rodrigues, 1994).

Os pontos de emissão de elétrons, denominados de pontos catódicos, apresentam grande luminosidade, mas tem vida muito curta, pois uma vez que removem a camada de óxido sobre a poça e arredores do arco há um fenômeno de limpeza de óxidos denominado de limpeza catódica. Desta forma o potencial de oxidação de um gás de proteção é uma das propriedades mais importantes, pois é responsável pela maior ou menor facilidade da emissão de elétrons no arco (Scotti e Ponomarev, 2008).

A capacidade de emissão de elétrons pelo cátodo, geralmente constituído pela peça no processo GMAW, depende da função de trabalho e da temperatura do mesmo. Sendo encontradas diferentes teorias sobre os mecanismos de liberação de elétrons para o arco e aquecimento do eletrodo como proposto por Lesnewich (1958); Baixo (1999); Waszink, (1982).

De acordo com Modenesi (2009) os pontos de emissão catódica tendem a se agrupar em manchas móveis e brilhantes na superfície do cátodo. O mecanismo

desta emissão não é completamente conhecido, mas deve envolver a formação de campos elétricos extremamente intensos na camada de óxido, pela adsorção de íons positivos, formando filetes condutores na camada, à emissão de elétrons, e posteriormente à destruição da camada neste local e, conseqüentemente, do ponto de emissão. Existem evidências de que mecanismos diferentes de emissão de elétrons podem operar ou competir entre si, e resultar no comportamento do arco.

O aquecimento na região catódica ocorre, principalmente, pela ação dos íons incidentes. Estes são acelerados ao atravessar o campo elétrico que se forma e se mantém no cátodo. A energia cinética é fornecida na colisão dos íons com o cátodo e também por outros mecanismos, como convecção, radiação e reações químicas de oxidação (Silva *et al.*, 2007).

De acordo com Verma (2006), oxidação significa perda de elétrons simultaneamente ao processo de redução (ganho de elétrons), constituem uma importante classe de reações químicas que ocorrem, podendo haver transferência completa de elétrons ou aumento e/ou diminuição da densidade de elétrons.

Em todos esses anos de utilização do processo GMAW quase nenhum estudo sistemático do mecanismo de emissão catódica foi realizado. Como citado anteriormente, as misturas utilizadas para proteção da poça de soldagem apresentaram características de atmosferas oxidantes devido os gases de proteção utilizados. Na soldagem de aços de baixo carbono verifica-se sempre um teor de oxigênio suficientemente alto (ou CO₂) que impede a instabilidade do mecanismo de emissão catódica.

Durante a operação normal de soldagem GMAW, o arco consome as camadas de óxido sobre o metal de base podendo levar ao estreitamento da poça de solda. Em seu trabalho Costa *et al.*, (2009) mostra ser possível mecanismos alternativos de emissão de elétrons. Neste sentido o processo poderia começar instável e, após um período de tempo, se tornaria estável. Se um mecanismo de emissão alternativa de elétrons não consome camadas de óxido, esta área deve não ser formada. Assim, as variações no aspecto da área em torno do cordão de soldagem podem ser utilizadas como uma indicação para operações alternativas de emissão de elétrons.

Um mecanismo alternativo é mostrado por Scotti e Ponomarev, (2008) especificamente o uso de gás com potencial redutor, H₂ adicionado em pequenas proporções aos gases inertes, como resultado tem-se o aumento do calor

adicionado ao metal de base (pois tem maior capacidade térmica e entalpia), provoca um acabamento superficial do cordão mais brilhante (limpeza de óxidos), sobretudo em soldagens de aço inoxidável, mas por outro lado dificulta a emissão por campo.

No trabalho de Tušek e Suban (2000), sobre o efeito da adição de hidrogênio ao argônio, para proteção na soldagem GMAW de aço inoxidável, é mostrado também que o hidrogênio retarda a formação de óxido na superfície da camada final da solda, resultando em um cordão de solda limpo e de melhor aparência.

Outra alternativa na adição de gás de proteção não oxidante seria a utilização de gases combustíveis como os hidrocarbonetos. No seu estado gasoso livre os hidrocarbonetos, quando submetido a pressões elevadas se tornam altamente instáveis e tendem a se decompor nos seus elementos básicos que são o carbono e o hidrogênio, quando isto ocorre é similar ao processo de combustão do gás, porém sem a presença de oxigênio, e liberam uma enorme quantidade de calor. É, portanto de grande interesse o conhecimento das reações de superfície que envolvem átomos do interior do metal com os adsorvidos oriundos da fase gasosa. Rodrigues (1994) diz que a decomposição dos hidrocarbonetos envolve a absorção do C e a liberação do H₂ da forma mostrada na figura 12, tendo como exemplo o metano.

Filho *et al.*, (2007) em seu trabalho sobre a influência do tipo de gás de proteção da soldagem GMAW na qualidade do cordão de aço inoxidável diz que para comparar a influência do gás de proteção na qualidade do cordão de solda (tanto em termo de aspecto, metalurgia e resistência mecânica) é necessário encontrar uma condição de soldagem que seja a melhor possível. A busca destes parâmetros torna-se um pouco complexa em função da quantidade de variáveis envolvida no processo de soldagem.

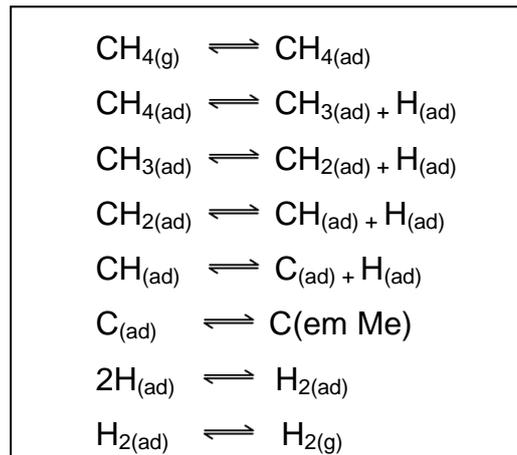


Figura 12: Etapas da decomposição do metano (Rodrigues, 1994).

2.5.1 Gases Combustíveis

Os estudos de reações químicas em altas temperaturas são geralmente complexos por envolverem muitos conceitos, equipamentos de precisão, turbulências hidrodinâmicas, gradientes de concentração acentuados. Devido a isto neste estudo tem-se a pretensão de contextualizar as informações mais pertinentes tornando a teoria o mais objetiva possível para compreensão dos fenômenos ocorridos na temperatura do arco.

De acordo com proposto por Martins (2011) a redução dos mecanismos cinéticos de reações químicas nos estudos é interessante pois alguns estados são consumidos rapidamente tão logo são produzidos, não interferindo na dinâmica de todas as reações.

Na literatura poucos estudos são encontrados especificamente para os gases utilizados em soldagem na perspectiva da análise química dos fenômenos. Neste tópico espera-se correlacionar as equações já estudadas amplamente para reações de combustão, cinética química das mesmas e informações tabeladas para entendimento do comportamento do propileno, um gás combustível hidrocarboneto, nestas altas temperaturas pois encontra-se no estado de plasma.

O plasma consiste de espécies altamente energéticas formadas de partículas neutras, íons, fótons e elétrons em equilíbrio em uma faixa de temperaturas que em soldas pode chegar a mais de 20000 °C.

A alta temperatura gerada pelo gás ionizado (plasma) juntamente com a dissociação por impacto de elétrons quebram as ligações químicas das moléculas formando radicais livres extremamente reativos e instáveis que, no resfriamento da mistura gasosa, se recombinam espontaneamente formando novas substâncias (Khalaf *et al.*, 2011).

A força de uma ligação química é medida pela energia necessária para rompê-la. Para fazer os cálculos das energias de dissociação de ligação é estabelecido que no rompimento de ligações o ΔH^0 é positivo, e para a formação de ligações o ΔH^0 é negativo.

Em moléculas diatômicas tem-se alguns valores tabelados, no entanto em moléculas com mais átomos tornam-se difíceis esses cálculos. Por exemplo a molécula de metano - CH₄ embora seja constituída de dois tipos de átomo a remoção de um H torna a vizinhança diferente e conseqüentemente a energia para remoção varia, conforme mostrado na tabela 3.

Tabela 3: Energia Média de Ligação C-H na molécula do CH₄ (Russell, 1994).

Processo	ΔH^0 , kJ mol ⁻¹ (25°C)
CH _{4(g)} → CH _{3(g)} + H _(g)	430
CH _{3(g)} → CH _{2(g)} + H _(g)	473
CH _{2(g)} → CH _(g) + H _(g)	422
CH _(g) → C _(g) + H _(g)	339

O tipo de ligação química entre os átomos também influencia na quantidade de calor de formação, outros exemplos para algumas ligações do C são mostrados na tabela 4.

Tabela 4: Energia Média de Ligações múltiplas do C (Russell, 1994).

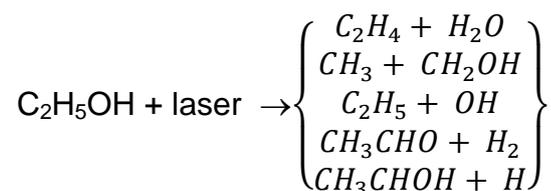
Processo	ΔH^0 , kJ mol ⁻¹ (25°C)
C=C	613
C≡C	845
C=O	799
C≡N	879

Curran (2009) em seu trabalho sobre mecanismos da combustão mostra que as reações envolvendo hidrocarbonetos e compostos oxigenados em altas temperaturas ocorrem seguindo inicialmente pelo sistema hidrogênio/oxigênio e

posteriormente o monóxido de carbono/dióxido de carbono e demais espécies com carbono.

Linnert (1989) em sua tese de doutorado sobre o estudo de espécies transientes em reações iniciadas por laser mostrou que o mecanismo exato de formação de espécies químicas orgânicas é difícil de ser obtido no entanto deve corresponder a um mecanismo semelhante ao de processos de combustão.

Linnert e Osolani (1985) mostraram que o etanol submetido a processos de dissociação devido ao uso de laser emitiu as seguintes espécies:



Linnert (2008) utilizando laser e CO_2 registrou que para a formação de OH, C_2 e CH como espécies transientes da decomposição do etanol, o H_2 e CH se formavam mais rapidamente devido aos valores da entalpia de formação (ΔH^0), mostradas na tabela 5. Foi também destacado em suas conclusões que estas mesmas espécies são características de sistemas a altas temperaturas. O CH é uma das espécies mais reativas existentes na combustão de hidrocarbonetos, reagindo com oxigênio atômico ou O_2 formando CO e com menor probabilidade CHO^+ .

Tabela 5: Valores da entalpia de formação de espécies transientes do etanol (Linnert, 2008).

Reações	Entalpia de formação (ΔH^0)
$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{laser} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$	39,8 kcal/mol
$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{laser} \rightarrow \text{C}_2 + \text{H}_2$	200,8 kcal/mol
$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{laser} \rightarrow \text{C}_2 + 2\text{H}$	304,2 kcal/mol
$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{laser} \rightarrow \text{CH} + \text{CH}$	143,7 kcal/mol

Uma síntese dos principais mecanismos de processos de combustão do hidrogênio, monóxido de carbono, metano, etileno, acetileno, etano, propano, butano, pentano, hexano foi feito por Martins (2011) e é mostrado na tabela 6. Permite observar que para todos os combustíveis estudados ocorreram etapas com

formação de CO, H₂O, O₂, H₂ e H. Rosenqvist (1974) aborda em seu trabalho que a dissociação dos gases CO₂ e H₂O é endotérmica.

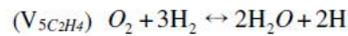
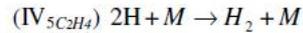
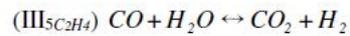
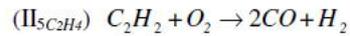
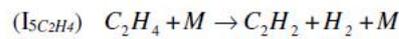
Strohle e Myhrvold, (2006) mostram que na combustão do hidrogênio as espécies transientes em maior concentração são o OH e H.

Das reações do etileno distingue-se a formação do acetileno em conformidade com os resultados encontrados por Mintusov *et al.*, (2009), que mostram a reação do etileno se decompondo em H₂ + C₂H₂ e H + C₂H₃.

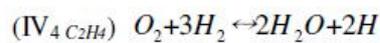
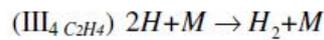
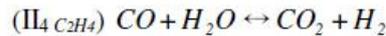
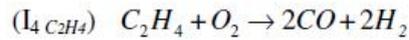
Tabela 6: Mecanismos de reações de combustão (Martins, 2011).

Gases	Equações
H ₂	$(I_{4H_2}) \quad O + H_2 \leftrightarrow OH + H$ $(II_{4H_2}) \quad H_2 + OH \leftrightarrow H_2O + H$ $(III_{4H_2}) \quad H + H + M \rightarrow H_2 + M$ $(IV_{4H_2}) \quad H + O_2 \leftrightarrow O + OH$
CO	$(I) \quad CO + 4H_2 \rightarrow CH_3 + 3H + H_2O$ $(II) \quad H_2 + O_2 + CO \rightarrow H_2O + CO_2$ $(III) \quad H_2 \rightarrow 2H$ $(IV) \quad 3H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2H$
CH ₄	$(I_{3CH_4}) \quad CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO + 2H_2$ $(II_{3CH_4}) \quad CO + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO_2$ $(III_{3CH_4}) \quad H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow H_2O$
Acetileno	$(I_{4C_2H_2}) \quad C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$ $(II_{4C_2H_2}) \quad CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ $(III_{4C_2H_2}) \quad H + H + M \rightarrow H_2 + M$ $(IV_{4C_2H_2}) \quad O_2 + 3H_2 \leftrightarrow 2H_2O + 2H$

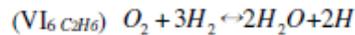
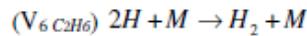
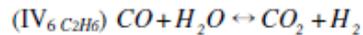
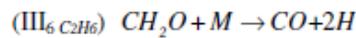
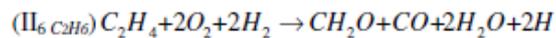
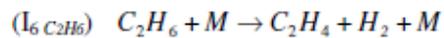
Etileno



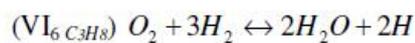
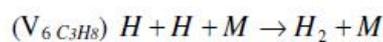
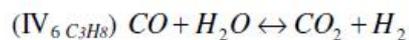
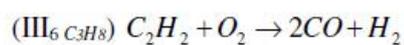
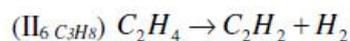
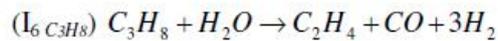
Etileno



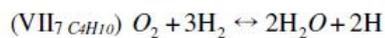
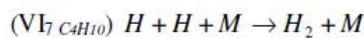
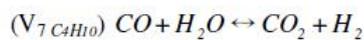
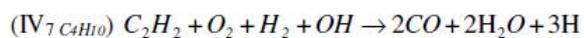
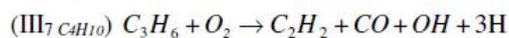
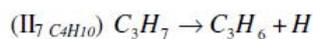
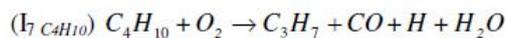
Etano



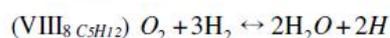
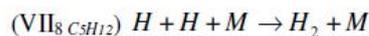
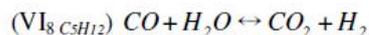
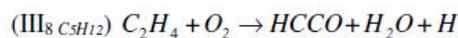
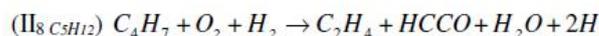
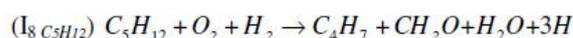
Propano



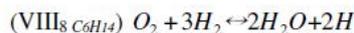
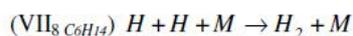
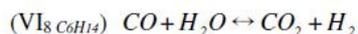
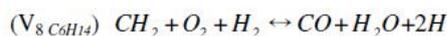
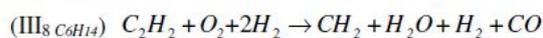
Butano



Pentano



Hexano



Da compreensão das reações previstas na química orgânica (Solomons, 1996) entende-se que os hidrocarbonetos com ligação dupla reagem convertendo a ligação pi (π) e uma ligação sigma (σ) em duas ligações sigma, na figura 13 isto é exemplificado na quebra de um alceno. Os elétrons da ligação π são expostos funcionando como núcleos suscetíveis a reações.

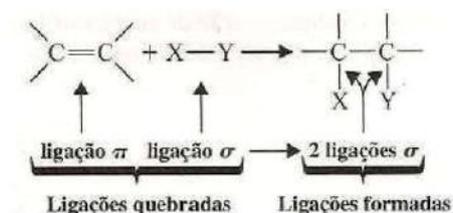


Figura 13: Decomposição de um alceno (Solomons, 1996).

No trabalho de Ramalho (2008) sobre o oxicorte são mostradas as energia de dissociação de alguns hidrocarbonetos na queima com O_2 . Entre estes o do propileno. Estas podem ser vistas na figura 14. Este autor mostra que são necessárias quantidades específicas de O_2 para obtenção de uma temperatura maior da chama.

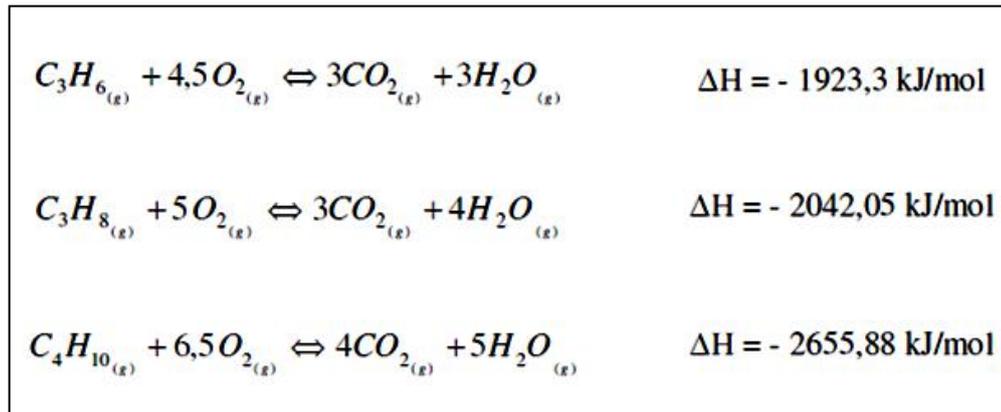
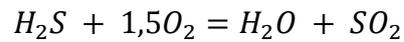
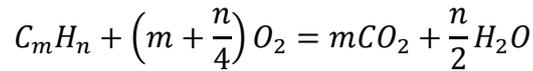


Figura 14: Energia de dissociação de hidrocarbonetos (Ramalho, 2008).

Brandi (1995) também ressaltam que a escolha do gás combustível altera o consumo de O_2 devido as diferentes proporções estequiométricas para reações completas.

A quantidade mínima de ar necessário para a combustão completa de um kg de combustível chama-se ar teoricamente necessário (ar estequiométrico) identificado por V_{ar}^0 .

Vlasov (2008) discute em seu trabalho sobre os fundamentos da combustão que sabendo-se da composição elementar de um combustível e a quantidade de mols usadas na reação é possível calcular a quantidade de oxigênio necessária para a combustão completa. Suas equações se diferenciam quando existe a presença ou não de oxigênio no próprio combustível. No cálculo da quantidade de ar estequiométrico para combustão de hidrocarbonetos gasosos são levadas em consideração as reações intermediárias para determinar o volume estequiométrico de oxigênio teórico necessário ($V_{O_2}^0$) para a combustão de um metro cúbico do combustível gasoso:



$$V_{ar}^{\circ} = 0,0476 \cdot (0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum(m + \frac{n}{4}) \cdot C_m H_n - O_2) N \cdot m^3 / N \cdot m^3 \quad (22)$$

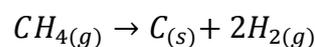
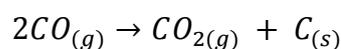
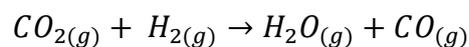
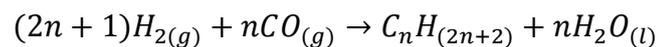
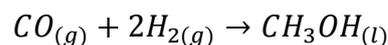
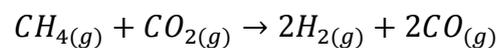
onde: não entram os componentes incombustíveis, e o oxigênio do próprio combustível gasoso está com sinal de menos porque este diminui a necessidade de combustível do ar. As equações acima são para CNTP.

O volume do ar em outras condições pode ser calculado pela seguinte equação termodinâmica:

$$V = V_{ar}^{\circ} \cdot \frac{101325 \cdot T_{col}}{P_{col} \cdot 273,15} \quad (23)$$

onde: P_{col} e T_{col} são a pressão em Pa e a temperatura em K do ar no coletor de admissão.

Khalaf *et al.*, (2011) explica em seu trabalho sobre produção de gás de síntese por plasma térmico que as impurezas de hidrocarbonetos contidas em misturas gasosas comerciais sofrem degradação durante o processo de reforma por plasma térmico. O excesso de CO_2 aumenta a conversão de metano e reduz a quantidade de carbono sólido gerado. São sugeridas as seguintes reações no processo:



CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e a metodologia empregada para o estudo comparativo da estabilidade do processo GMAW, com atmosferas convencionais de proteção e com adições de teores do gás combustível propileno são apresentados neste capítulo.

3.1 Materiais

- Chapa de aço carbono SAE 1020 com 6,20 mm de espessura cortadas com dimensões de 200 mm x 50 mm.
- Chapa de aço carbono SAE 1020 com 12,7 mm de espessura cortadas com dimensões de 200 mm x 130 mm.
- Bobina com arame de $\varnothing 1,2$ mm, classificação ER70S-6.
- Discos de corte e desbaste.
- lixas de granulometria 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh,
- Alumina de 1 e 0,5 μm
- Nital 10%.
- Verniz.
- Líquido penetrante lavável em água: VP30.
- Revelador metal D-70.
- Cilindros de Gases White Martins:
 - i- Ar,
 - ii- CO_2 ,
 - iii- Ar + 12,0% CO_2 + 2,0% C_3H_6 ,
 - iv- Ar + 25,0% CO_2 + 3,0% C_3H_6 ,
 - v- 95,0% CO_2 + 5,0% C_3H_6 ,
 - vi- Ar + 12,0% CO_2 + 0,4% C_3H_6 ,
 - vii- Ar + 25,0% CO_2 + 0,6% C_3H_6 ,
 - viii- 98,7% CO_2 + 1,3% C_3H_6 .

3.2 Metodologia

A metodologia empregada para avaliar a influência das atmosferas de proteção na estabilidade do processo GMAW consiste de quatro etapas.

A primeira etapa teve como objetivo avaliar a possibilidade da adição do gás combustível propileno em atmosferas de proteção convencionais na soldagem GMAW com transferência metálica por curto circuito.

A segunda etapa teve como objetivo identificar os teores de propileno para adição nas atmosferas de proteção convencionais que apresentaram melhor estabilidade do processo.

Na terceira etapa o objetivo foi avaliar a estabilidade do processo, comparando soldas realizadas em atmosferas de proteção convencionais com as obtidas em atmosferas de proteção com adição de propileno sob as mesmas condições de soldagem.

Na quarta etapa foi feito o estudo da influência da atmosfera de proteção com adição de propileno nas características do metal de solda.

Durante as etapas manteve-se alguns aspectos gerais relativos a soldagem e a obtenção das atmosferas de proteção conforme apresentado respectivamente nos sub itens 3.2.1 e 3.2.2. A metodologia específica de cada etapa é mostrada nos sub itens 3.2.3 etapa I; 3.2.4 etapa II; 3.2.5 etapa III e 3.2.6 etapa IV.

3.2.1 Soldagem

Nas primeiras três etapas foram executadas soldas tipo cordão sobre a chapa, pelo processo GMAW com transferência metálica por curto circuito. Na tabela 7 são mostradas as variáveis e parâmetros de soldagem que foram mantidos constantes durante todos os experimentos. Os equipamentos utilizados são mostrados na figura 15: posicionador para mecanização da soldagem, a máquina de solda, o equipamento SAPV4, e o rotâmetro.

Tabela 7: Variáveis fixas para as primeiras três etapas.

Variáveis	
Chapas de Teste	aço SAE 1020
Dimensões das chapas de teste (CT)	6,20 x 50 mm x 200 mm
Arame	ER70S-6 de diâmetro 1,2 mm
Soldagem	Mecanizada
Velocidade de soldagem	300 mm/min
Posição de soldagem	Plana
Ângulo da tocha	90° em relação a face da solda
Distância do bico de contato a peça (DBCP)	15 mm
Vazão do gás de proteção	15 l/min
Regulagem da Indutância	fixa



Figura 15: Equipamentos utilizados na realização da soldagem.

Na soldagem o uso das atmosferas de proteção foi aleatório. A corrente de soldagem (I) foi mantida no intervalo de 157 a 212 A, ajustando-se a velocidade de alimentação do arame, de acordo com a experiência do soldador, e a tensão (U) no intervalo de 18,5 a 25,5 V. Esses intervalos foram fundamentados nas referências Getmanets e Korinets (1983), White Martins (2014) que estabelecem uma faixa de corrente de 100-340 A para soldagem com o arame ER70S-6.

Simultâneo a soldagem foram captados os sinais com o equipamento SAPV4 fabricado pelo IMC soldagem. O início da sincronização dos dados foi feito com uma resolução de 0,004 s. A base do tempo de visualização do sinal captado foi de 0,2 s. No SAPV4 a taxa de amostragem de cada variável captada é numa frequência de 5 kHz. Para garantir que a região dos sinais apresente maior relação com a regularidade do processo, os intervalos de maior variação foram desconsiderados. Estes costumam ser os segundos iniciais da ignição do arco elétrico e os finais. As conexões para captura da I x U foram feitas nos bornes da máquina, com os fios esticados. Neste trabalho em todas as análises foram utilizados intervalos de 20 s, desconsiderando-se os instantes iniciais e finais.

3.2.2 Obtenção das Atmosferas de Proteção

As atmosferas de proteção convencionais escolhidas foram: dióxido de carbono (CO₂) puro e em misturas com Argônio (Ar), devido serem comercialmente as mais utilizadas. São responsáveis por fornecer uma proteção com potencial oxidante em função das reações no arco. O gás propileno foi o escolhido na família dos gases combustíveis.

Os gases utilizados nas atmosferas de proteção das quatro etapas deste trabalho foram obtidos de duas formas: diretamente de cilindros e por misturas realizadas com rotâmetros. O fabricante de gases White Martins Gases Ltda disponibilizou os cilindros com gases comerciais e também produziu as misturas com adições do gás combustível propileno especialmente para esta pesquisa.

O acondicionamento dos gases de proteção em cilindros é feita com base na teoria apresentada no item 2.4 da revisão bibliográfica. O método de fabricação é gravimétrico e o fator de abrangência utilizado foi $k=2$. O fator é utilizado como multiplicador da incerteza da medição, produzindo um intervalo com nível de confiança de aproximadamente 95%. O certificado de garantia da qualidade das misturas foram expedidos, e os valores de incerteza na adição do gás de menor percentual portanto foi mantido inferiores aos estabelecidos pela norma AWS 5.32M (2011) que é de $\pm 10\%$ do valor nominal para adições em concentrações maiores que 5%; e de $\pm 0,5\%$ para adições em concentrações entre 1 e 5%. A norma não especifica os valores de incerteza para adições inferiores a 1%.

As misturas preparadas com uso de rotômetros tem uma margem de erro relativo, nas composições dos componentes com menores concentrações de até 10% (Lobato e Neto, 2003). Na figura 16 é mostrado o rotômetro utilizado, de propriedade do Centro de Tecnologia Rio da White Martins, onde é possível identificar a entrada de cada gás, sendo ajustadas separadamente a vazão. Os gases se misturam no interior de um “pulmão” localizado logo após a saída dos rotômetros.

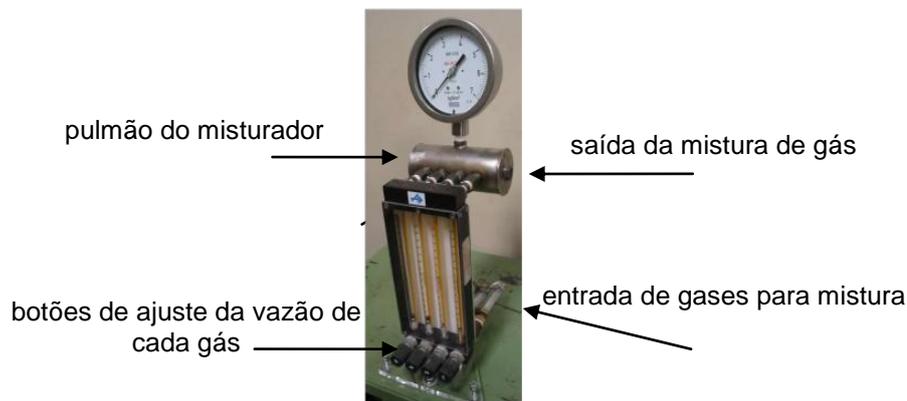


Figura 16: Misturador com rotômetros (Lobato e Neto, 2003).

O balanceamento dos percentuais das misturas é feito utilizando-se variáveis como a pressão, vazão e temperatura dos gases. Estas constam compiladas no banco de dados do programa ROTO_BR (Lobato e Neto, 2003). A planilha do programa ROTO_BR, como exemplo, é mostrada na figura 17.

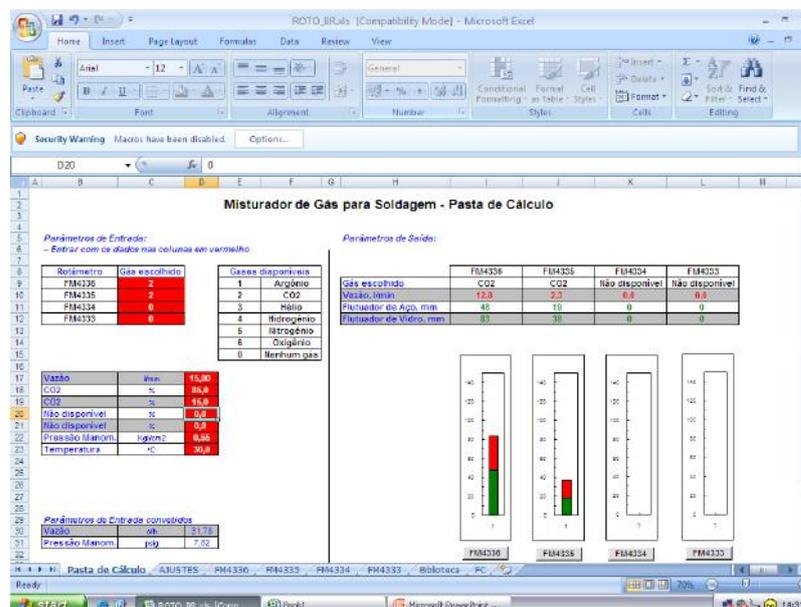


Figura 17: Exemplo da planilha utilizada no Programa ROTO_BR.

3.2.3 Etapa I - Avaliação da Adição do Gás Combustível Propileno em Atmosferas de Proteção Convencionais na Soldagem GMAW

Nesta etapa foram realizados estudos qualitativos referentes aos gases de proteção, amplamente utilizados na soldagem do aço carbono, no processo GMAW com transferência metálica por curto circuito. Identifica-se que esse modo de transferência produz uma poça de fusão adequada para diversas condições e materiais (Tatagiba *et al.*, 2012; Pires *et al.*, 2007; Weglowski *et al.*, 2008; Quites, 2002).

A avaliação das atmosferas de proteção com adições do gás combustível propileno na soldagem teve como objetivos a identificação da possibilidade de abertura do arco; a partir da análise da estabilidade, em comparação com soldas em atmosferas de proteção convencionais, estimar os limites mínimos e máximos para adição de propileno com obtenção de soldas consideradas adequadas.

3.2.3.1 Atmosferas de Proteção Utilizadas na Soldagem

Nesta etapa foram utilizadas as atmosferas de proteção para soldagem listadas na tabela 8, onde consta também o método de obtenção e a identificação.

Tabela 8: Atmosferas de proteção - etapa I.

	Atmosferas de Proteção	Método de Obtenção	Identificação
1.	88,0%Ar + 12,0%CO ₂	rotâmetro	Ar+12CO ₂
2.	86,0%Ar + 12,0%CO ₂ + 2,0%C ₃ H ₆	cilindro	Ar+12CO ₂ +2C ₃ H ₆
3.	75,0%Ar + 25,0%CO ₂	rotâmetro	Ar+25CO ₂
4.	72,0%Ar + 25,0%CO ₂ + 3,0%C ₃ H ₆	cilindro	Ar+25CO ₂ +3C ₃ H ₆
5.	100,0%CO ₂	cilindro	CO ₂
6.	95,0%CO ₂ + 5,0%C ₃ H ₆	cilindro	CO ₂ +5C ₃ H ₆
7.	97,5%CO ₂ + 2,5%C ₃ H ₆	rotâmetro	CO ₂ +2,5C ₃ H ₆
8.	98,5%CO ₂ + 1,5%C ₃ H ₆	rotâmetro	CO ₂ +1,5C ₃ H ₆
9.	99,5%CO ₂ + 0,5%C ₃ H ₆	rotâmetro	CO ₂ +0,5C ₃ H ₆

A soldagem foi feita de acordo com os aspectos gerais mostrados na tabela 7, sendo a *FAST MIG KEMPPi* a máquina de solda utilizada. Foi utilizada em modo convencional. Foi regulada a velocidade de alimentação do arame para manter um intervalo de corrente de 157,7 a 185,1 A, a tensão regulada foi de 18,5 a 25,4 V. Através do SAPV4 foram captados os sinais de 2 chapas de teste durante a

soldagem em cada atmosfera de proteção mostrada na tabela 8, com exceção das atmosferas: $\text{CO}_2+2,5\text{C}_3\text{H}_6$; $\text{CO}_2+1,5\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ nas quais foram captados sinais de apenas uma chapa de teste, totalizando 15 soldas para estudo.

3.2.3.2 Avaliação dos Cordões de Solda

A análise dos cordões de solda foi feita com foco no acabamento da superfície e no formato do cordão. Pode-se afirmar que a qualidade da solda está relacionada com características desejáveis para determinada aplicação. São considerados como critérios para a qualidade da solda: ausência de defeitos e descontinuidades como trincas e poros, bom acabamento da superfície, reforço e largura adequados, a quantidade de respingos, entre outras.

3.2.3.2.1 Inspeção Visual e Líquido Penetrante

As chapas de teste imediatamente após soldagem foram observadas visando identificar a existência de descontinuidades grosseiras, escória e respingos aderidos. Logo em seguida foi realizada a limpeza e o ensaio visual seguindo as recomendações do procedimento PR-050 (ABENDI, 2011). Neste são destacadas as condições para realização do ensaio visual: boa iluminação da solda e limpeza por escovamento. Durante o ensaio deve ser observado a presença de trinca, falta de fusão e penetração, poros, mordeduras entre outras descontinuidades. O ensaio de líquido penetrante foi realizado por profissional qualificado do setor UO-BC/IPP/EISUP-PETROBRAS, segundo o procedimento PR-001 (ABENDI, 2008) para identificação da presença de pequenas descontinuidades superficiais. Foi utilizado no procedimento o líquido penetrante lavável em água: VP30 e o revelador metal D-70.

3.2.3.2.2 Características Geométricas

Foram feitas macrografias e o cálculo do índice de convexidade (IC) para o estudo das características geométricas. As amostras foram retiradas da seção transversal ao cordão da solda, com dimensões de 6,20 mm x 50 mm x 20 mm. Nestas foram feitas as etapas de preparação metalográfica, utilizando-se lixas de granulometria: 320, 400 e 600 mesh respectivamente. Posteriormente fez-se o ataque químico, com uma solução de Nital com concentração de 10%, em um tempo de 10 s.

As dimensões da solda foram medidas diretamente na macrografia com auxílio de um paquímetro, sendo determinados: o reforço (r), penetração (p) e a largura (l) do cordão. Estes dados permitem uma avaliação das características da junta obtida com as diferentes atmosferas de proteção. Os resultados permitem também o cálculo do índice de convexidade, que relaciona o reforço e a largura do cordão de solda. Estima-se que um IC próximo de 30% indica um cordão de solda considerado de qualidade, sem reforço excessivo e com penetração adequada (Silva *et al.*, 2000; Paiva *et al.*, 2010; Tatagiba, 2015). A equação para o cálculo do IC é:

$$IC = \frac{rf}{la} \cdot 100 (\%) \quad (24)$$

onde:

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

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

As chapas de teste foram pesadas antes da soldagem. Após soldagem as chapas de teste passaram por limpeza por escovamento e novamente foram pesadas. Foi utilizada uma balança com resolução de 0,01 g. Foram calculadas as taxas de deposição (Td) das soldas para verificar a influência da atmosfera de proteção. O cálculo da Td é realizado de acordo com a equação 24, que mostra a razão entre a quantidade de metal depositado (Td) e o tempo soldando a amostra (tsa). O tsa é obtido diretamente no SAP, sua unidade de medida é ms. Os dados devem ter suas unidades de medida convertidas para que o resultado da Td seja expresso em kg/h:

$$T_d = \frac{\text{Quantidade de Metal Depositado}(kg)}{\text{tempo soldando amostra}(h)} \quad (24)$$

3.2.3.3 Avaliação da Repetitividade da Transferência Metálica

Foram analisados oscilogramas dos valores instantâneos da $I \times U$ para observar a influência da atmosfera de proteção. Estes são plotados a partir dos sinais captados durante a soldagem na qual foi utilizado o SAPV4. A análise da repetitividade da transferência foi feita utilizando-se os índices mostrados na tabela 9. Estes índices são fornecidos pelo SAPV4.

Tabela 9: Índices para análise da repetitividade da transferência - etapa I.

Índices
Média do tempo de arco aberto (t_{ab})
Média do tempo de curto circuito (t_{cc})
Média do período de transferências (P)
Desvio padrão dos períodos de arco aberto (DPAA)
Desvio padrão dos períodos de curto circuito (DPCC)

3.2.4 Etapa II - Definição dos Teores de Adição de Propileno nas Atmosferas Convencionais com Melhor Estabilidade

O objetivo desta etapa foi complementar os resultados obtidos na etapa I, permitindo identificar o percentual de adição do gás combustível propileno, nas atmosferas de proteção convencionais testadas, que resultam em melhor estabilidade do processo. Esta etapa se diferencia da anterior devido ao ajuste de maiores valores de $I \times U$ de soldagem, diluição das misturas de proteção com Ar e novas diluições da mistura $95\%CO_2 + 5\%C_3H_6$. São portanto estudadas soldas em condições diferentes se comparadas com as da etapa I.

3.2.4.1 Atmosferas de Proteção Utilizadas na Soldagem

Na etapa II utilizou-se as atmosferas de proteção listadas na tabela 10, onde também se encontra o método de obtenção e a sua identificação. Foram captados sinais pelo SAPV4 em duas chapas de teste soldadas em cada atmosfera de

proteção, sendo um total portanto de 22 soldas para estudo. Na soldagem utilizou-se os aspectos gerais mostrados no item 3.2.1 com ajuste da velocidade de alimentação de arame de forma a obter intervalos de corrente entre 186,6 e 207 A, a tensão foi regulada de 21,1 a 24,8 V. A máquina de solda utilizada foi convencional SOLMIG 403-CV.

Tabela 10: Atmosferas de Proteção - etapa II.

	Atmosferas de Proteção	Método de Obtenção	Identificação
1.	87,50%Ar + 12,00%CO ₂ + 0,50%C ₃ H ₆	rotâmetro	Ar+12CO ₂ +0,5C ₃ H ₆
2.	87,00%Ar + 12,00%CO ₂ + 1,00%C ₃ H ₆	rotâmetro	Ar+12CO ₂ +1C ₃ H ₆
3.	74,50%Ar + 25,00%CO ₂ + 0,50%C ₃ H ₆	rotâmetro	Ar+25CO ₂ +0,5C ₃ H ₆
4.	74,00%Ar + 25,00%CO ₂ + 1,00%C ₃ H ₆	rotâmetro	Ar+25CO ₂ +1C ₃ H ₆
5.	75,00%Ar + 23,75%CO ₂ + 1,25%C ₃ H ₆	rotâmetro	Ar+23,75CO ₂ +1,25C ₃ H ₆
6.	100,00%CO ₂	cilindro	CO ₂
7.	97,00%CO ₂ + 3,00%C ₃ H ₆	rotâmetro	CO ₂ +3C ₃ H ₆
8.	98,00%CO ₂ + 2,00%C ₃ H ₆	rotâmetro	CO ₂ +2C ₃ H ₆
9.	98,50%CO ₂ + 1,50%C ₃ H ₆	rotâmetro	CO ₂ +1,5C ₃ H ₆
10.	99,00%CO ₂ + 1,00%C ₃ H ₆	rotâmetro	CO ₂ +1C ₃ H ₆
11.	99,50%CO ₂ + 0,50%C ₃ H ₆	rotâmetro	CO ₂ +0,5C ₃ H ₆

3.2.4.2 Avaliação dos Cordões de Solda

Na avaliação dos cordões de solda desta etapa foi feita inspeção visual e líquido penetrante; pesagens das chapas de teste; avaliação das características geométricas por macrografias e do IC; cálculo da taxa de deposição. Seguindo o discutido no item 3.2.3.2.

3.2.4.3 Avaliação da Repetitividade da Transferência Metálica

Semelhante ao apresentado na etapa I, item 3.2.3.3, foram analisados oscilogramas dos valores instantâneos da I x U e obtidos os índices mostrados na tabela 11.

Tabela 11: Índices para análise da repetitividade da transferência - etapa II.

Índices
Média do tempo de arco aberto (t_{ab})
Média do tempo de curto circuito (t_{cc})
Média do período de transferências (P)
Desvio padrão dos períodos de arco aberto (DPAA)
Desvio padrão dos períodos de curto circuito (DPCC)

3.2.5 Etapa III - Comparação da Estabilidade do Processo GMAW com Adições de Propileno nas Atmosferas de Proteção Convencionais em duas faixas de I X U

O objetivo desta etapa foi comparar a influência da adição de propileno nas atmosferas de proteção convencionais na estabilidade do processo de soldagem GMAW. Foram utilizados dois ajustes de I x U de soldagem, identificados na tabela 12, a velocidade de alimentação foi ajustada de forma a manter a corrente nesses intervalos. É feito um aprofundamento do estudo da estabilidade como consequência das atmosferas de proteção.

Os dados estatísticos fornecidos pelo SAPV4 são inter relacionados para levar a um melhor entendimento de como se pode classificar a melhor estabilidade, de forma como sugerido nos trabalhos de Dutra (1989); Baixo e Dutra (1995); Suban e Tušek (2003); Dutra (2009); Scotti e Ponomarev (2014); Liskévycck e Scotti (2010).

Tabela 12: Identificação da regulagem de I x U de soldagem - etapa III.

Regulagem de I x U	Identificação
$175,0 \pm 8,1 \text{ A} / 18,9 \pm 0,2 \text{ V}$	Ajuste 1
$208,3 \pm 3,8 \text{ A} / 21,9 \pm 1,4 \text{ V}$	Ajuste 2

3.2.5.1 Atmosferas de Proteção Utilizadas na Soldagem

As atmosferas de proteção utilizadas nesta etapa, o método de obtenção e a sua identificação são mostradas na tabela 13. Utilizou-se a máquina de solda convencional SOLMIG 403-CV NAVY. Foram captados os sinais com o SAPV4 de 2 chapas de teste em atmosfera convencional e 3 nas atmosferas com adição de C_3H_6

no ajuste 1. No ajuste 2 foram captados sinais de 3 chapas de teste em cada atmosfera de proteção. Foram estudadas um total de 33 soldas.

Tabela 13: Atmosferas de proteção - etapa III.

	Atmosferas de Proteção	Método de Obtenção	Identificação
1.	88,0%Ar + 12,0%CO ₂	rotâmetro	Ar+12CO ₂
2.	87,6%Ar + 12,0%CO ₂ +0,4%C ₃ H ₆	cilindro	Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆
3.	75,0%Ar + 25,0%CO ₂	rotâmetro	Ar+25CO ₂
4.	74,4%Ar + 25%CO ₂ +0,6%C ₃ H ₆	cilindro	Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆
5.	100,0% CO ₂	cilindro	CO ₂
6.	98,7%CO ₂ +1,3%C ₃ H ₆	cilindro	CO ₂ +1,3C ₃ H ₆

3.2.5.2 Avaliação dos Cordões de Solda

Na avaliação dos cordões de solda desta etapa também foi feito inspeção visual e líquido penetrante; pesagens das chapas de teste; avaliação das características geométricas por macrografias e do IC; cálculo da taxa de deposição. Seguindo o discutido no item 3.2.3.2.

3.2.5.3 Estimativa da Estabilidade do Processo GMAW

Nesta etapa foi feito um aprofundamento do estudo das soldas no que se refere a qualidade inter relacionada com a repetitividade da transferência e sua influência na estabilidade do processo. São utilizados os índices: a média dos picos de corrente (MPC); desvio padrão dos picos de corrente (DPPC) e média da taxa de descida da corrente (diD/dt) também fornecidos pelo software do SAPV4. Os histogramas dos picos de corrente, ciclogramas e o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IV_{cc}) também foram analisados.

3.2.6 Etapa IV - Caracterização do Metal de Solda Depositado nas atmosferas de Proteção com Adições de Propileno

Nesta etapa o objetivo foi verificar a influência das atmosferas de proteção nas características do metal de solda no que se refere a sua composição química, microestrutura e sua propriedade de microdureza em comparação com a de atmosferas convencionais.

3.2.6.1 Atmosferas de Proteção da Soldagem

As atmosferas de proteção utilizadas foram: $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$; $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$; $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ para deposição de metal de solda nesta etapa. Um corpo de prova em cada atmosfera de proteção, totalizando três corpos de prova para o estudo. Foram seguidos os critérios da norma ASME SFA-5.18 / SFA-5.18M/ 2007 - *Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*, que orientam a retirada de amostras para análise química. É especificado que a altura mínima dos cordões para formação da almofada deve ser de 9,5 mm. A vazão do gás estabelecida foi de 15 L/min. As chapas de teste utilizadas foram de aço SAE 1020 com 12,7 mm de espessura cortadas com dimensões de 200 mm x 130 mm. O arame utilizado foi o ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. A I x U utilizada foi mantida dentro da faixa de 175 a 210 A - 19 a 23 V. A soldagem foi manual com máquina de solda SOLMIG 403-CV NAVY, mantendo a DBCP em torno de 15 mm. Durante a deposição dos cordões fez-se o controle da temperatura entre passes com lápis térmico, assegurando temperaturas de até 150 °C. A norma considera aceitável até 165 °C.

3.2.6.2. Análise Química

Na figura 18 pode ser visto o esquema representativo da almofada e do corpo de prova retirado para análise química. A região de retirada foi no sentido do último cordão em direção aos primeiros, com dimensões de 20 mm x 22 mm x 70 mm, mantendo a superfície de forma plana. A análise química foi executada por método

analítico com o Espectrômetro PMI Master de emissão ótica, de propriedade do setor E&P-SERV/US-SOEP/OM/OPR-PETROBRAS.

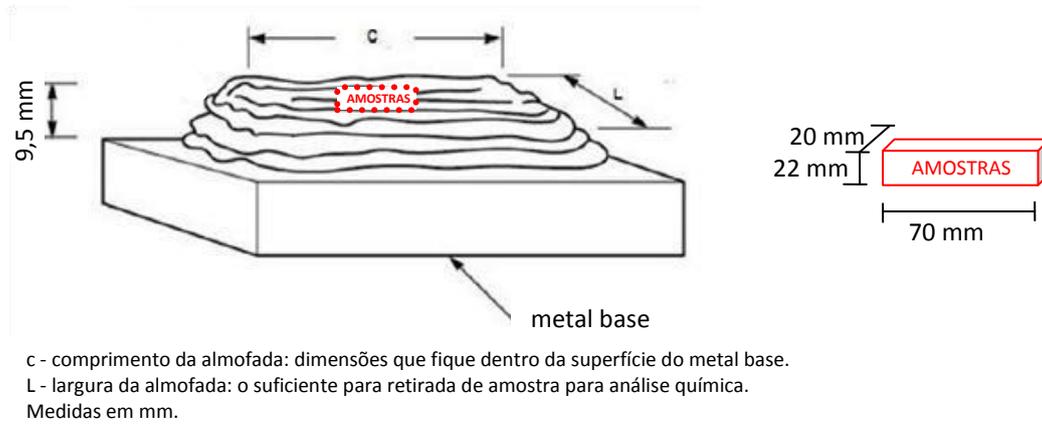


Figura 18: Esquema representativo da almofada para retirada de amostras da análise química (ASME SFA-5.18 / SFA-5.18M, 2007).

3.2.6.3 Análise Microestrutural

Na caracterização microestrutural do metal depositado em cada atmosfera de proteção foram utilizadas as mesmas amostras em que foi feita a análise química. Isto porque o ensaio, devido as dimensões das amostras, ocorreu em uma área muito pequena e bem delimitada. O objetivo foi verificar a influência das atmosferas de proteção utilizadas na microestrutura formada.

As amostras foram preparadas com lixas de granulometria de 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, polimento em solução de alumina de 1 e 05 μm , ataque químico numa solução de Nital com concentração de 2% por aproximadamente 10 s. Capturou-se 15 micrografias com aumentos de 250x, de forma aleatória, em cada uma das três atmosferas de proteção com adição de propileno. Utilizou-se o microscópio ótico Olympus modelo Infinity 1 GX41 disponível no Laboratório de Materiais Avançados da UENF.

As micrografias permitem a identificação dos tipos de morfologia da ferrita. A identificação tem como base o documento a “Instrução para classificação dos Constituintes Microestruturais do Metal de Solda dos Aços Ferríticos, utilizando-se Microscopia Ótica” da subcomissão IX do Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

3.2.6.4 Análise de Microdureza Vickers

Para verificar a influência da atmosfera de proteção na alteração da microdureza do material realizou-se o ensaio de microdureza Vickers. Foram realizadas 15 impressões em cada uma das três amostras, utilizando-se uma carga de 50 g. O equipamento utilizado foi o Microdurômetro do fabricante Shimadzu do Brasil modelo HMV-2, disponível no Laboratório de Materiais Avançados da UENF.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e a discussão do estudo da influência da adição do gás combustível propileno nas atmosferas convencionais de proteção e seus efeitos na estabilidade do processo GMAW. Conforme apresentado no capítulo 3, foram realizadas soldas de deposição utilizando-se atmosferas de proteção convencionais: dióxido de carbono (CO_2) puro e em misturas com argônio (Ar). Nestas atmosferas foram adicionados teores de propileno entre 0,5 e 5%. Durante as soldagens foram captados sinais com o equipamento SAPV4.

A estabilidade do processo é identificada a partir das análises dos cordões de soldas e da repetitividade da transferência.

4.1 Etapa I: Avaliação da Adição de propileno em Atmosferas de Proteção Convencionais na Soldagem GMAW

A verificação da soldabilidade do aço carbono em atmosferas com adição de propileno foi o objetivo principal desta etapa. Foi necessário também identificar a regulagem dos parâmetros corrente (I) e tensão (U) que proporcionasse melhor estabilidade na soldagem. Antes da captação dos sinais, da soldagem para o estudo, foram realizadas soldas preliminares para identificação dos parâmetros I x U de soldagem. Estas não são citadas e discutidas neste trabalho.

Foram necessárias regulagens diferentes dos parâmetros de I x U para soldagem nas atmosferas convencionais se comparadas com as soldas nas atmosferas com adição de propileno. O ajuste da velocidade de alimentação foi feito para manter a corrente nestes valores. Os parâmetros médios da I x U e velocidade de alimentação, captados pelo SAPV4, na soldagem da chapa de teste 1 (CT1) e chapa de teste 2 (CT2) são mostrados na tabela 14.

Maiores valores de tensão foram utilizados na soldagem com atmosferas em que foram feitas as adições de C_3H_6 . Neste caso, como foram mantidas constantes as outras variáveis do processo (tipo e diâmetro do arame, posição de soldagem, velocidade de soldagem, distância do bico de contato a peça (DBPC), vazão do gás,

corrente), pode-se atribuir a necessidade do aumento da tensão à adição de C_3H_6 na atmosfera de proteção convencional.

O soldador relatou que sentia certa dificuldade no aquecimento da solda em atmosferas com adição de propileno, por isso foi estabelecida a maior tensão. A máquina de solda utilizada FAST MIG KEMPPI, no modo convencional.

Embora o propileno tenha um baixo potencial de ionização, pode ser visto na tabela 1, se comparado com os outros gases, que o seu calor específico molar é quatro vezes maior que a do Ar e quase o dobro do CO_2 , demonstrando a necessidade de maior energia para manutenção do arco. Na literatura, explicações sobre a influência da tensão no comprimento do arco, como a encontrada no trabalho de Souza *et al.*, (2011), mostram a necessidade de maior regulagem de tensão em atmosferas com gases de maior capacidade térmica. No trabalho de Scotti e Ponomarev (2014) é mostrada a necessidade de maior tensão do arco para uma mesma corrente média também devido à diferença na condutividade térmica desses gases. No trabalho de Hooijmans (1994) sobre o processo TIG, em que são feitas adições de H_2 no gás de proteção Ar, também é mostrada a necessidade de maior tensão do arco para uma mesma corrente média. O autor justifica a necessidade de mais energia para manter determinada corrente devido à diferença na condutividade térmica e no potencial de ionização desses gases.

Tabela 14: Valores médios da velocidade de alimentação de arame, corrente e tensão durante a soldagem - etapa I.

Atmosferas de Proteção	Velocidade de alimentação de arame		Corrente registrada no SAP (A)		Tensão registrada no SAP (A)	
	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2
Ar+12CO ₂	4,1	3,8	178,3	175,4	19,4	18,6
Ar+12CO ₂ +2C ₃ H ₆	4,2	4,1	169,6	163,9	23,1	23,4
Ar+25CO ₂	3,8	4,1	185,1	179,4	20,4	18,5
Ar+25CO ₂ +3C ₃ H ₆	2,9	4,1	166,5	170,6	23,1	22,8
CO ₂	3,4	4,0	184,8	174,1	20,8	20,7
CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	4,1	-	169,5	-	25,1	-
CO ₂ +1,5C ₃ H ₆	4,1	-	167,8	-	25,1	-
CO ₂ +2,5C ₃ H ₆	4,0	-	177,8	-	25,4	-
CO ₂ +5C ₃ H ₆	3,5	4,1	157,7	159,3	25,1	25,0

4.1.1 Cordões de Solda

4.1.1.1 Inspeção Visual e Líquido Penetrante

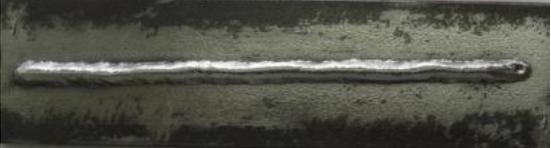
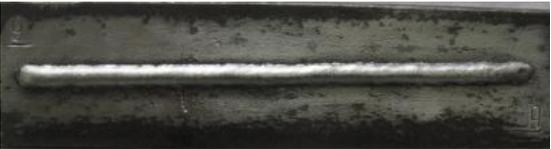
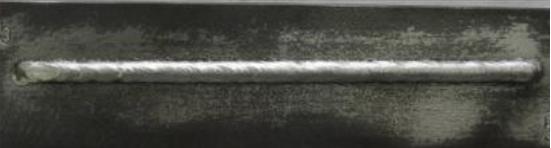
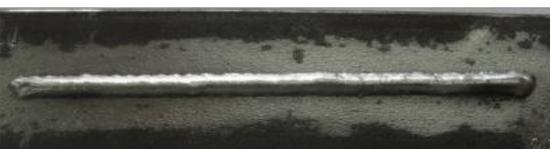
As soldas mostradas na tabela 15 foram submetidas ao ensaio de inspeção visual e líquido penetrante (LP). Os cordões obtidos na atmosfera de proteção convencional Ar+12CO₂ tem aspecto liso, com boa aparência e presença de respingos. As soldas em atmosfera de proteção Ar+12CO₂+2C₃H₆ apresentaram cordões também com boa aparência, e qualitativamente redução considerável de respingos. No entanto estas soldas foram reprovadas devido à presença de poros no ensaio de LP.

A solda obtida com atmosfera de proteção Ar+25CO₂ apresentou um cordão de solda isento de poros e mais estreito se comparado à solda em atmosfera Ar+25CO₂+3C₃H₆. Porém, estas últimas foram reprovadas devido à presença de poros, logo identificados no ensaio visual, onde também pode ser visto aparente diminuição dos respingos e da formação de escória.

As soldas feitas com atmosfera de proteção CO₂ mostram aspecto liso no acabamento da solda, boa aparência e poucos respingos, demonstrando a identificação adequada dos parâmetros de soldagem. Nas atmosferas CO₂+5C₃H₆ as soldas apresentaram grande quantidade de poros, escória, estas soldas foram reprovadas. À medida que foi reduzido o percentual de adição de C₃H₆ para 2,5%, 1,5% e 0,5% foram obtidas soldas de boa aparência, com ausência de poros e aparente diminuição de respingos.

As adições dos teores 2%, 3% e 5% do gás combustível C₃H₆ foram baseadas nos estudos de Gülenç *et al.*, (2005); Suban e Tušek (2001); Irving (1999); Vaidya (2002); Biskup, (2003); Tatagiba (2015) e na norma AWS A5.33 (2011). Em especial a norma orienta o uso de até 5%H₂ na soldagem do aço inoxidável. Devido os processos de dissociação do propileno no arco espera-se a presença como produto de moléculas de H₂. O balanço estequiométrico mostra que na decomposição de cada molécula de C₃H₆ há a formação de três moléculas de H₂. Esse teor de H₂ na atmosfera de proteção, se analisado do ponto de vista das frações volumétricas, corresponde a um volume quase três vezes maior do que o utilizado por Tatagiba (2015) em seu trabalho sobre a soldagem do aço carbono com atmosfera de proteção de CO₂ e adições de até 6%H₂, onde foram obtidos bons resultados da solda.

Tabela 15: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem, limpeza e ensaio LP - etapa I.

		Chapa Soldada	Após limpeza	Ensaio LP
ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	Ar+12CO ₂			
				
	Ar+12CO ₂ +2C ₃ H ₆			
				
	Ar+25CO ₂			
				

Continuação tabela 15.

ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	Ar+25CO ₂ +3C ₃ H ₆	CO ₂	CO ₂ +5C ₃ H ₆	Não se aplica	Não se aplica
					
					
					
				Não se aplica	Não se aplica

Continuação 2: tabela 15.

ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	$\text{CO}_2+2,5\text{C}_3\text{H}_6$	$\text{CO}_2+1,5\text{C}_3\text{H}_6$	$\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$
			 13.1
			 6.6
			 13.3

4.1.1.2 Características Geométricas

A estabilidade do arco implica tanto na facilidade da operação de soldagem como na obtenção de uma geometria o mais regular possível para o cordão de solda, sendo útil portanto a avaliação da qualidade da solda.

A figura 19 mostra as macrografias de cada chapa de teste, respectivamente chapa de teste 1 e chapa de teste 2, em cada atmosfera de proteção, indicando os valores de largura, reforço e penetração obtidos.

As soldas em atmosfera Ar+12CO₂ obtiveram maior largura, valores próximos do reforço e da penetração em relação às soldas com Ar+12CO₂+2C₃H₆.

As soldas em atmosfera Ar+25CO₂ se comparadas com as em Ar+25CO₂+3C₃H₆ evidenciam uma menor largura e penetração, manutenção do reforço com valores aproximados.

As soldas em atmosfera CO₂ puro tem largura menor se comparadas às executadas nesta atmosferas com adições 5%, 2,5%, 1,5% e 0,5% de propileno. O reforço e a penetração tem valores próximos.

A tabela 16 mostra os valores do índice de convexidade (IC) de cada chapa de teste soldada na respectiva atmosfera de proteção.

As soldas em atmosfera Ar+12CO₂ tem maior IC do que as soldas em Ar+12CO₂+2C₃H₆.

As soldas em atmosfera Ar+25CO₂ tem IC maior do que as soldas em Ar+25CO₂+3C₃H₆.

Se comparadas as soldas em atmosfera CO₂ com as soldas em atmosferas CO₂+5C₃H₆, CO₂+2,5C₃H₆, CO₂+1,5C₃H₆, CO₂+0,5C₃H₆ são encontrados menores valores de IC nestas com adição de propileno. Pode ser visto ainda que o IC da solda em atmosfera de proteção CO₂+5C₃H₆ foi de 27,59% mas a solda apresentou grande quantidade de poros, considerada reprovada. Em referências que utilizam esse critério como Bonanni, (2005); Silva *et al.*, (2000); Tatagiba (2015), de forma geral consideram melhor qualidade da solda as que apresentam IC próximo ou menor que 30%. Neste trabalho, o cálculo do IC serve para qualificar a relação entre largura e reforço das soldas realizadas.

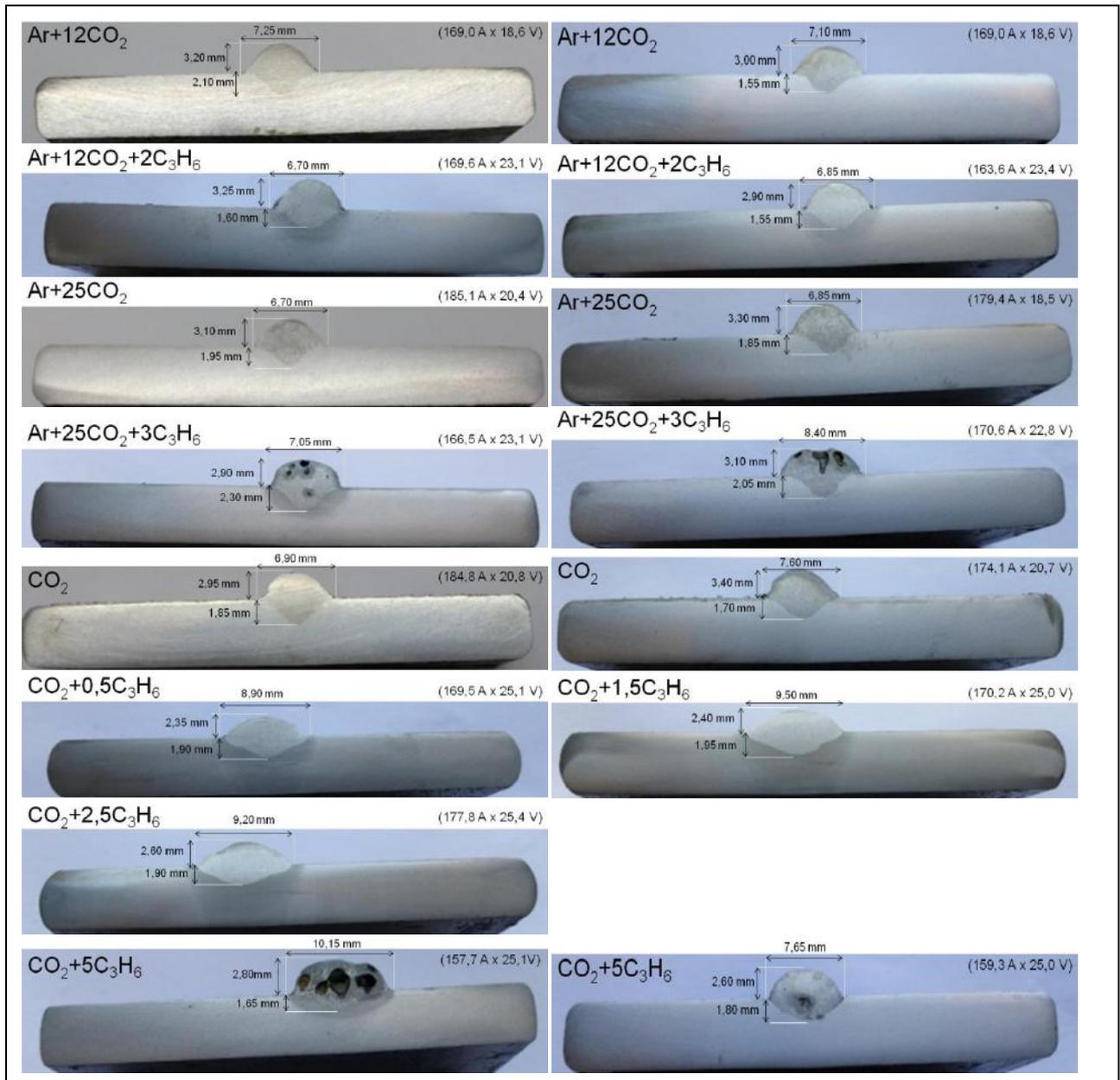


Figura 19: Geometria da solda - etapa I.

Tabela 16: Índice de Convexidade (IC) - etapa I.

Atmosferas de Proteção	IC (%)		Atmosferas de Proteção	IC (%)	
	CT1	CT2		CT1	CT2
Ar+12CO ₂	44,14	42,25	CO ₂	42,75	44,74
Ar+12CO ₂ +2C ₃ H ₆	48,51	42,34	CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	26,40	-
Ar+25CO ₂	46,27	48,18	CO ₂ +1,5C ₃ H ₆	25,26	-
Ar+25CO ₂ +3C ₃ H ₆	41,13	36,90	CO ₂ +2,5C ₃ H ₆	28,26	-
			CO ₂ +5C ₃ H ₆	27,59	33,99

Na tabela 17 são mostrados os dados utilizados no cálculo da taxa de deposição (Td). Esta informação indica o quanto produtivo é o conjunto: parâmetro de soldagem e gás de proteção, já que todos os corpos de prova apresentam o mesmo comprimento.

As soldas em atmosferas Ar+12CO₂ tem menor Td do que as soldas em Ar+12CO₂+2C₃H₆.

A Td das soldas em atmosferas Ar+25CO₂ tem menor Td do que a do primeiro corpo de prova soldado em Ar+25CO₂+3C₃H₆ e próximo da Td do segundo corpo de prova.

A Td das soldas em atmosferas CO₂ apresentam valores próximos das soldas em atmosferas CO₂+2,5C₃H₆, CO₂+1,5C₃H₆, CO₂+0,5C₃H₆. Estes são maiores do que a Td das soldas obtidas em atmosfera CO₂+5C₃H₆.

A maior influência nas variações da Td é da regulagem dos parâmetros de soldagem I x U e não devido as atmosferas de proteção utilizadas.

Tabela 17: Taxa de deposição - etapa I.

Atmosferas de Proteção		Peso antes da solda (g)	Peso após limpeza da solda (g)	Metal depositado (g)	Tempo de soldagem tsa(s)	Taxa de Deposição (kg/h)
Ar+12CO ₂	CT1	502,0	520,7	18,7	32,44	2,075
Ar+12CO ₂	CT2	495,5	514,8	19,3	33,49	2,074
Ar+12CO ₂ +2C ₃ H ₆	CT1	497,8	517,0	19,2	32,19	2,147
Ar+12CO ₂ +2C ₃ H ₆	CT2	493,3	512,7	19,4	32,36	2,158
Ar+25CO ₂	CT1	496,6	515,1	18,5	32,67	2,038
Ar+25CO ₂	CT2	490,6	509,8	19,2	33,50	2,063
Ar+25CO ₂ +3C ₃ H ₆	CT1	499,7	519,0	19,3	29,62	2,345
Ar+25CO ₂ +3C ₃ H ₆	CT2	498,1	517,1	19,0	33,23	2,058
CO ₂	CT1	504,2	522,4	18,2	32,28	2,030
CO ₂	CT2	498,7	517,4	18,7	33,35	2,019
CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	CT1	492,3	511,3	19,0	32,94	2,076
CO ₂ +1,5C ₃ H ₆	CT1	474,9	494,0	19,1	33,04	2,081
CO ₂ +2,5C ₃ H ₆	CT1	484,8	503,8	19,0	32,52	2,103
CO ₂ +5C ₃ H ₆	CT1	492,1	510,5	18,4	39,61	1,672
CO ₂ +5C ₃ H ₆	CT2	498,9	516,9	18,0	32,89	1,970

4.1.2 Repetitividade da Transferência Metálica

Na tabela 18 são mostrados os resultados dos índices para análise da repetitividade da transferência: média do tempo de arco aberto (t_{ab}), média do tempo de curto-circuito (t_{cc}), média do período de transferências (P); desvio padrão do período de arco aberto (DPAA) e o desvio padrão dos períodos de curto-circuito (DPCC). Observa-se a tendência da adição do propileno aumentar o tempo de formação da gota, que é associado ao índice t_{ab} , na maioria das atmosferas, com exceção de uma solda em atmosfera $CO_2+5C_3H_6$.

No entanto, verifica-se também um aumento do tempo de transferência da gota, associado ao t_{cc} , nas atmosferas $Ar+12CO_2+2C_3H_6$, $Ar+25CO_2+3C_3H_6$ se comparadas com as em atmosferas de $Ar+12CO_2$ e $Ar+25CO_2$. Nestas atmosferas não são significativas as diferenças nos valores do índice DPCC.

Os maiores valores do DPAA são das soldas em atmosferas de proteção com adição de propileno devido aos maiores valores do período de transferências (P).

As soldas em atmosferas $CO_2+2,5C_3H_6$; $CO_2+1,5C_3H_6$; $CO_2+0,5C_3H_6$, se comparadas com as em atmosfera de CO_2 e as em $CO_2+5C_3H_6$, apresentaram maior valor do índice t_{ab} , menor t_{cc} , maior P e menor DPCC. O DPAA foi maior nestas atmosferas, fato que é justificado pelo maior valor do t_{ab} .

Tabela 18: Resultados dos índices tempo de arco aberto (t_{ab}); tempo de curto circuito (t_{cc}); período de transferências (P); desvio padrão do período de arco aberto (DPAA) e o desvio padrão dos períodos de curto circuito (DPCC) - etapa I.

Atmosferas de Proteção	t_{ab} (ms)		t_{cc} (ms)		P (ms)		DPAA (ms)		DPCC (ms)	
	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2
$Ar+12CO_2$	7,6	7,5	3,5	2,6	11,1	10,1	4,7	3,5	2,7	1,2
$Ar+12CO_2+2C_3H_6$	12,6	12,0	3,4	3,6	16,0	15,6	7,2	6,9	1,3	1,6
$Ar+25CO_2$	6,1	5,9	2,4	2,4	8,5	8,3	3,0	2,8	1,6	1,7
$Ar+25CO_2+3C_3H_6$	11,5	10,9	4,0	3,5	15,4	14,4	6,0	5,7	2,1	1,8
CO_2	9,7	8,5	3,9	3,7	13,6	12,2	6	4,8	2,9	2,7
$CO_2+0,5C_3H_6$	13,6	-	2,5	-	16,1	-	8,7	-	1,7	-
$CO_2+1,5C_3H_6$	14,8	-	2,6	-	17,4	-	9,7	-	1,7	-
$CO_2+2,5C_3H_6$	15,6	-	2,7	-	18,3	-	9,9	-	1,8	-
$CO_2+5C_3H_6$	12,4	8,9	3,7	2,6	16,0	11,5	6,7	5,3	2,1	1,9

4.1.3 Considerações Finais

- Na regulagem dos parâmetros de soldagem I x U identificou-se a necessidade do aumento da tensão quando feitas adições do gás combustível propileno. Essa variação mostra que o bom comportamento do gás é em conjunto com os parâmetros de soldagem escolhidos. Para comparação dos resultados obtidos esta característica deve ser levada em consideração.
- Na avaliação dos cordões, todas as soldas em atmosferas com adições de propileno, qualitativamente, mostram uma diminuição na formação de respingos. No entanto, os corpos de prova soldados nas atmosferas de proteção $\text{Ar}+12\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+3\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{CO}_2+5\text{C}_3\text{H}_6$ foram reprovados devido a presença de poros, atribuído ao teor excessivo de H_2 , liberado na poça de solda, como consequência das reações de dissociação do C_3H_6 no arco.
- Os segundos iniciais, próximos a abertura do arco, e finais próximos a extinção do arco, tem comportamento mais variável dos sinais em todas as soldas. Foi necessária a determinação de um intervalo, maior possível, para que fosse melhor representado o comportamento dinâmico do arco.
- Os índices propostos para análise da repetitividade da transferência mostram que as soldas nas atmosferas com adições de propileno apresentam maior tempo de crescimento da gota para transferência, fato que pode ser considerado relacionado com a diminuição da formação de respingos, mesmo nas soldas reprovadas. Nestas os índices t_{cc} e DPCC, apresentaram maiores valores. No entanto deve ser destacado também que a regulagem dos parâmetros de I x U, devido as consequências relacionadas ao comprimento do arco, influenciam estes resultados.
- Verificou-se a viabilidade da soldagem do aço carbono, nas atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ e CO_2 nas quais foram feitas adições de propileno. Foi estabelecido que para a próxima etapa serão utilizadas adições máximas de 1% de propileno nas misturas $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ e de 3% máximo de propileno para o CO_2 . Ainda, serão regulados maiores valores de corrente, para verificar a influência da atmosfera de proteção nesta condição de soldagem.

4.2 Etapa II: Determinação dos Teores de Adição de Propileno nas Atmosferas de Proteção que Apresentam Melhor Estabilidade do Processo

Nesta etapa, como consequência dos resultados da etapa I, são feitas soldagens em atmosferas de proteção convencionais com menores teores de adição do gás combustível propileno: Ar+12CO₂+1C₃H₆; Ar+12CO₂+0,5C₃H₆; Ar+23,75CO₂+1,25C₃H₆; Ar+25CO₂+1C₃H₆; Ar+25CO₂+0,5C₃H₆; CO₂+3C₃H₆; CO₂+2C₃H₆; CO₂+1,5C₃H₆; CO₂+1C₃H₆; CO₂+0,5C₃H₆. São feitas soldas também em atmosfera com CO₂ puro.

Através da regulagem da velocidade de alimentação foi feito o aumento do valor de corrente se comparado com os valores utilizados na etapa I e maiores valores da tensão em alguns corpos de prova numa mesma atmosfera de proteção. Os resultados obtidos nesta etapa são analisados em conjunto com os da etapa I, para identificação da influência do parâmetro de $I \times U$ e do teor de adição de propileno que resultam em soldas de boa qualidade e melhor repetitividade da transferência de metal.

Na tabela 19 são mostrados os valores médios da velocidade de alimentação, $I \times U$ captados pelo SAPV4 durante a soldagem desta etapa. Os maiores valores de corrente foram estabelecidos para serem proporcionais a maior tensão de soldagem necessária, com base nos resultados da etapa I, nas soldas em atmosferas com adições de C₃H₆.

Tabela 19: Valores médios da velocidade de alimentação de arame, corrente e tensão durante a soldagem - etapa II.

Atmosferas de Proteção	Velocidade de alimentação de arame		Corrente registrada no SAP(A)		Tensão registrada no SAP(A)	
	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2
Ar+12CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	4,7	4,7	201,7	205,1	21,3	21,1
Ar+12CO ₂ +1C ₃ H ₆	4,8	5,0	199,3	198,3	23,0	22,8
Ar+25CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	4,6	4,8	202,2	209,8	22,2	23,1
Ar+25CO ₂ +1C ₃ H ₆	4,5	4,6	200,8	197,0	22,0	22,8
Ar+23,75CO ₂ +1,25C ₃ H ₆	4,7	4,9	199,8	204,9	22,3	22,5
CO ₂	5,5	5,5	205,2	207,1	22,2	22,1
CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	5,2	5,0	198,7	198,3	24,0	22,4
CO ₂ +1C ₃ H ₆	4,9	5,2	192,8	204,0	24,8	21,6
CO ₂ +1,5C ₃ H ₆	5,2	5,2	203,9	206,9	24,5	21,5
CO ₂ +2C ₃ H ₆	5,1	5,2	188,6	208,7	21,8	22,5
CO ₂ +3C ₃ H ₆	5,2	5,2	204,0	203,4	22,2	22,2

Na figura 20 são mostradas as tensões utilizadas em função das maiores correntes de soldagem na etapa II se comparadas com a etapa I.

Em atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ foram utilizadas tensões próximas a 23,0 e 21,0 V respectivamente.

Em atmosferas $\text{Ar}+25\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ variou-se a tensão entre 22,0 e 22,8 V, na atmosfera $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ manteve-se uma variação da tensão entre 22,2 e 23,1 V.

Nas atmosferas de CO_2 foram utilizadas tensões maiores que na etapa I, com valores próximos de 22 V nas duas soldas, o mesmo valor foi usado na soldagem em atmosfera $\text{CO}_2+3\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$.

Em atmosferas $\text{CO}_2+1,5\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ um corpo de prova foi soldado com tensão próxima a 24 V e o outro a 21,5 V. As variações na tensão foram visando identificar o melhor ajuste desse parâmetro no processo operacional.

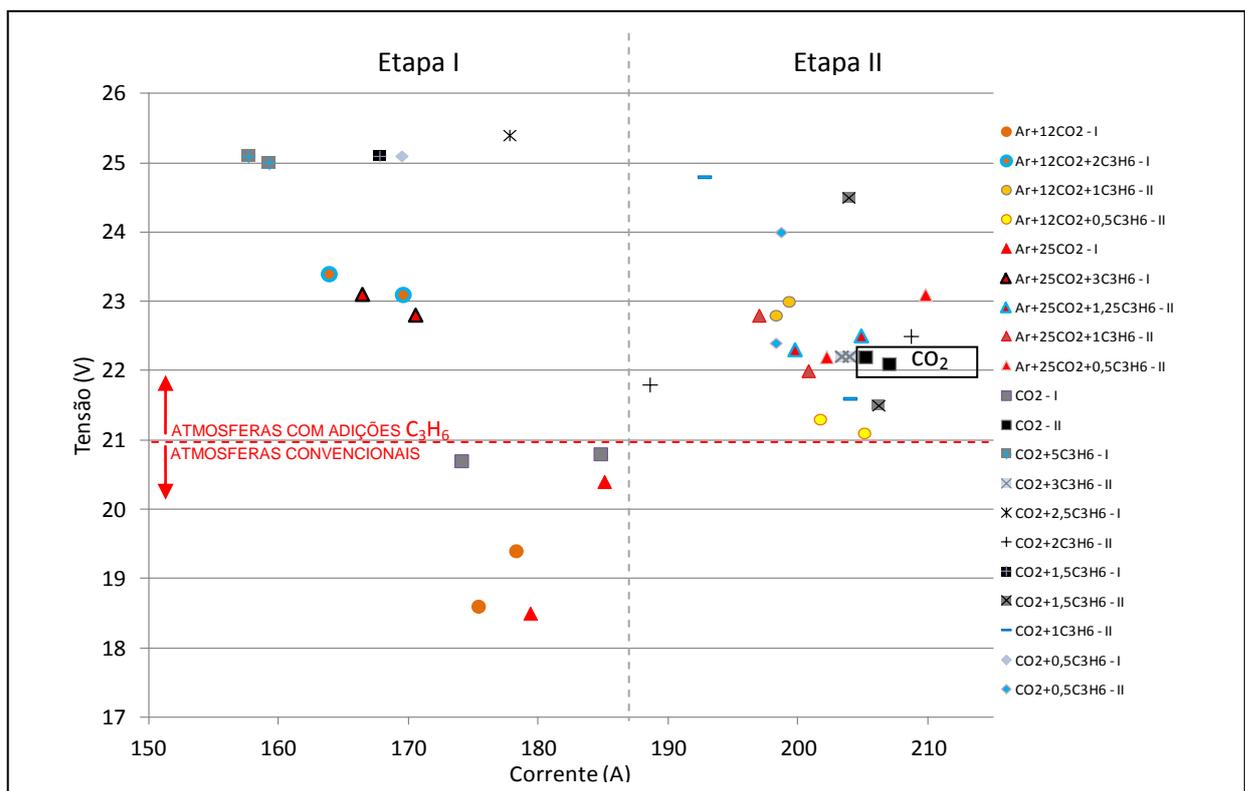


Figura 20: Comparação entre os parâmetros I x U ajustados nas etapas I e II.

4.2.1 Cordões de Solda

4.2.1.1 Inspeção Visual e Líquido Penetrante

Na tabela 20 podem ser vistas as chapas de teste soldadas na etapa II, nas condições: como soldado, soldado após limpeza e soldado após limpeza e ensaio LP. Todos os cordões das soldas desta etapa apresentam boa aparência.

De forma qualitativa, foi observado a formação de maior quantidade de escória nas soldas em atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas com as soldas da etapa I em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$, e $\text{Ar}+12\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$. Atribuído ao uso de maior corrente de soldagem. Nestas soldas não foram identificados poros, todas foram aprovadas no ensaio de LP.

As soldas em atmosferas $\text{Ar}+23,75\text{CO}_2+1,25\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ qualitativamente apresentam menos escória do que as em atmosferas $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2+3\text{C}_3\text{H}_6$ da etapa I. A regulagem do parâmetro de soldagem se mostrou mais adequada para estas atmosferas de proteção. Não foram identificados poros nas soldas, sendo todas aprovadas no ensaio de LP.

As soldas em atmosferas com CO_2 puro evidenciam o bom ajuste dos parâmetros $I \times U$, apresentando bom aspecto visual do cordão, não sendo perceptível o aumento de escória. Comparadas com as soldas em CO_2 puro da etapa I pode se dizer que o melhor aspecto é observado nas soldas da etapa II, atribuído ao melhoria do ajuste de $I \times U$.

Nos registros fotográficos do LP, é possível observar a formação de poros na solda em atmosfera $\text{CO}_2+3\text{C}_3\text{H}_6$, reprovada neste ensaio. As soldas nas atmosferas $\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{CO}_2+1,5\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ apresentam, semelhante as da etapa I, bom aspecto do cordão e foram aprovadas no ensaio de LP. Os teores podem ser considerados bons tanto na soldagem com uso de correntes menores como da etapa I, quanto com maiores valores de corrente, testados na etapa II.

O ensaio de inspeção visual foi importante para mostrar que as adições de propileno em teores adequados não foram prejudiciais pois não apresentam a formação de descontinuidades nos cordões de solda.

A obtenção de cordões de solda sem formação de poros permite estabelecer o limite máximo de 1,00% para adição de propileno em atmosferas de proteção $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ e 2,50% em CO_2 .

Tabela 20: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem, limpeza e ensaio LP - etapa II.

		Chapa Soldada	Após limpeza	Ensaio LP
ATMOSEFERAS DE PROTEÇÃO	$\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$			
				
	$\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$			
				
	$\text{Ar}+23,75\text{CO}_2+1,25\text{C}_3\text{H}_6$			
				

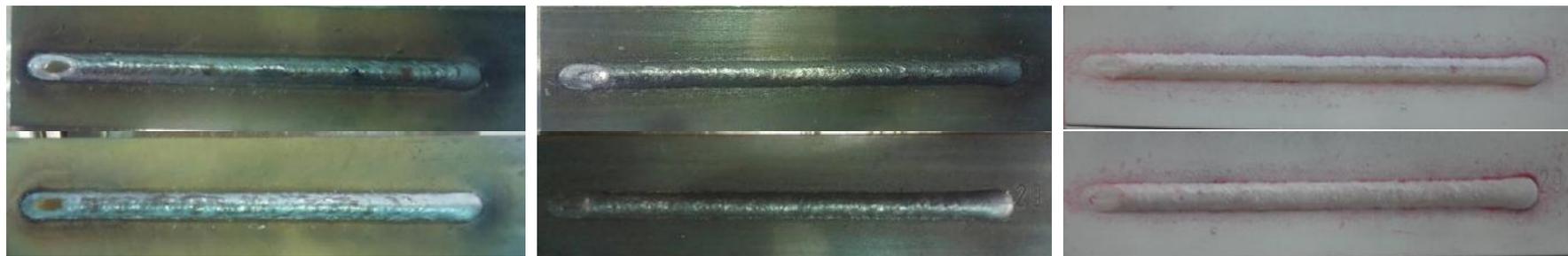
Continuação tabela 20.

ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO

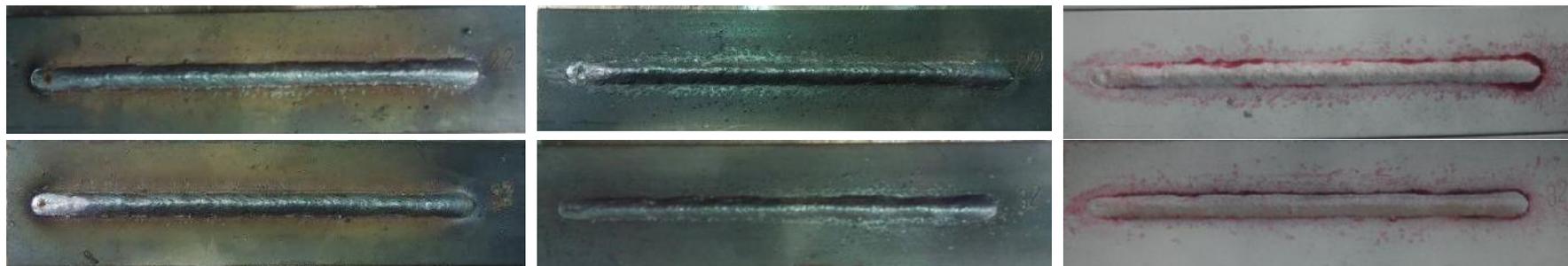
Ar+25CO₂+1C₃H₆



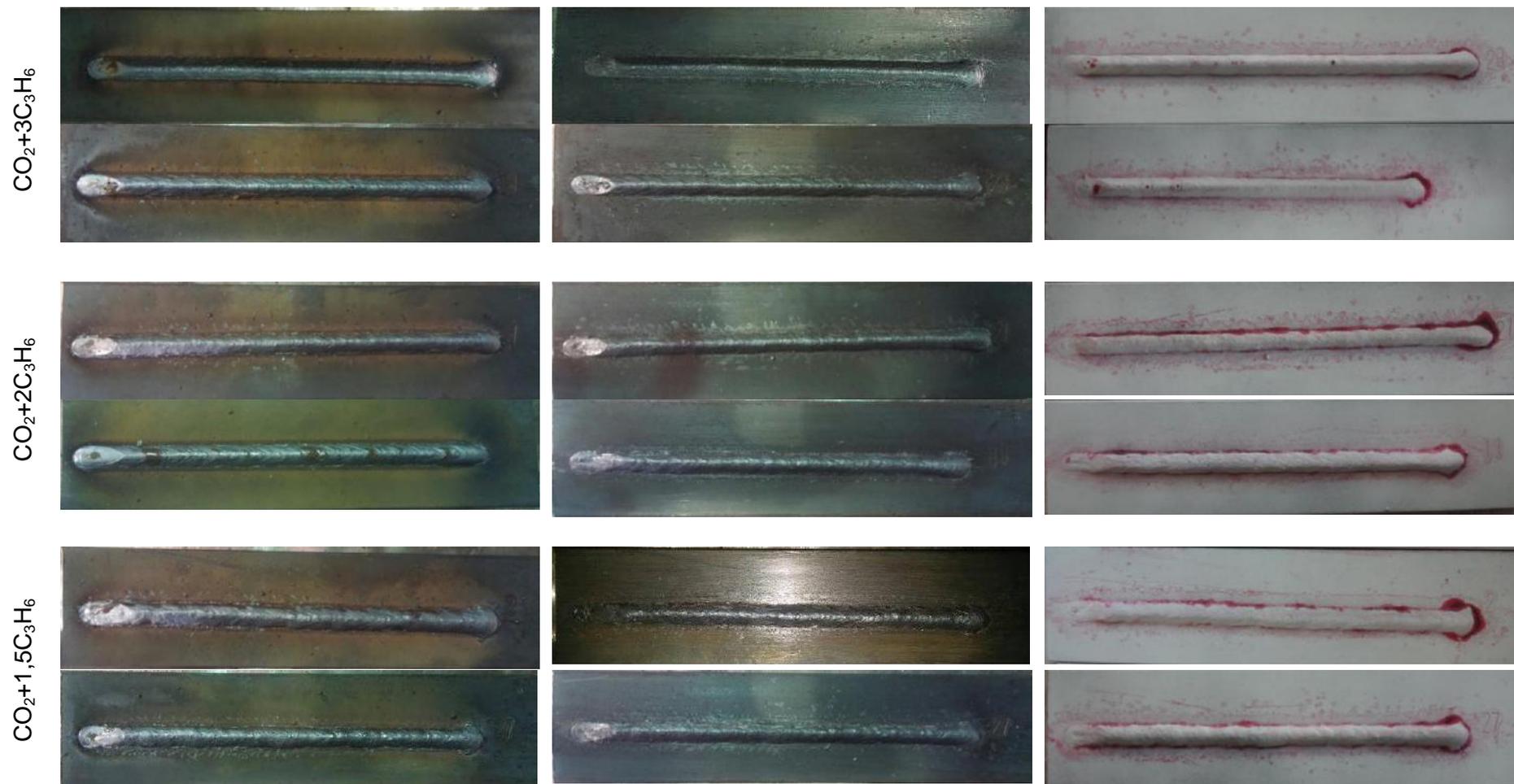
Ar+25CO₂+0,5C₃H₆



CO₂

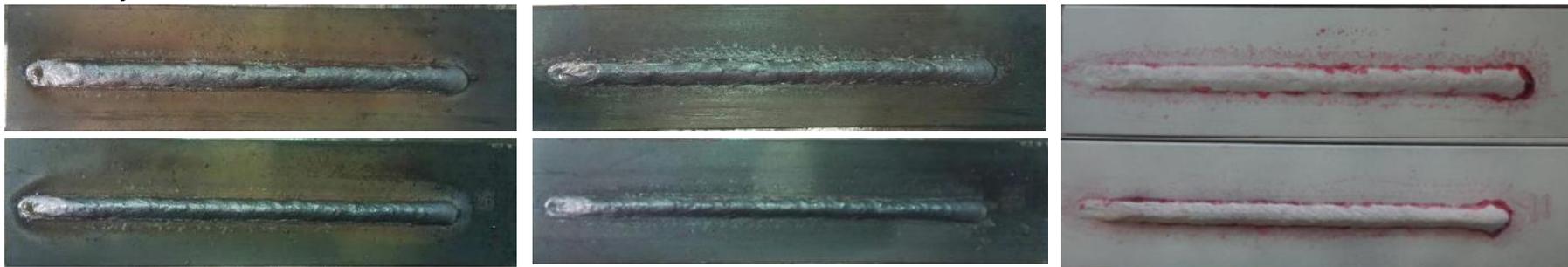


Continuação 2: tabela 20.



Continuação 3: tabela 20.

$\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$



$\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$



4.2.1.2 Características Geométricas

Na figura 21 pode ser verificado a largura, reforço e penetração dos corpos de prova soldados em atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$. São obtidos valores relativamente próximos de largura, penetração e reforço. O mesmo também é observado se comparadas as macrografias das soldas em atmosferas $\text{Ar}+23,75\text{CO}_2+1,25\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$, as quais tem valores ligeiramente maiores que os das macrografias das soldas em atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e em $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$.

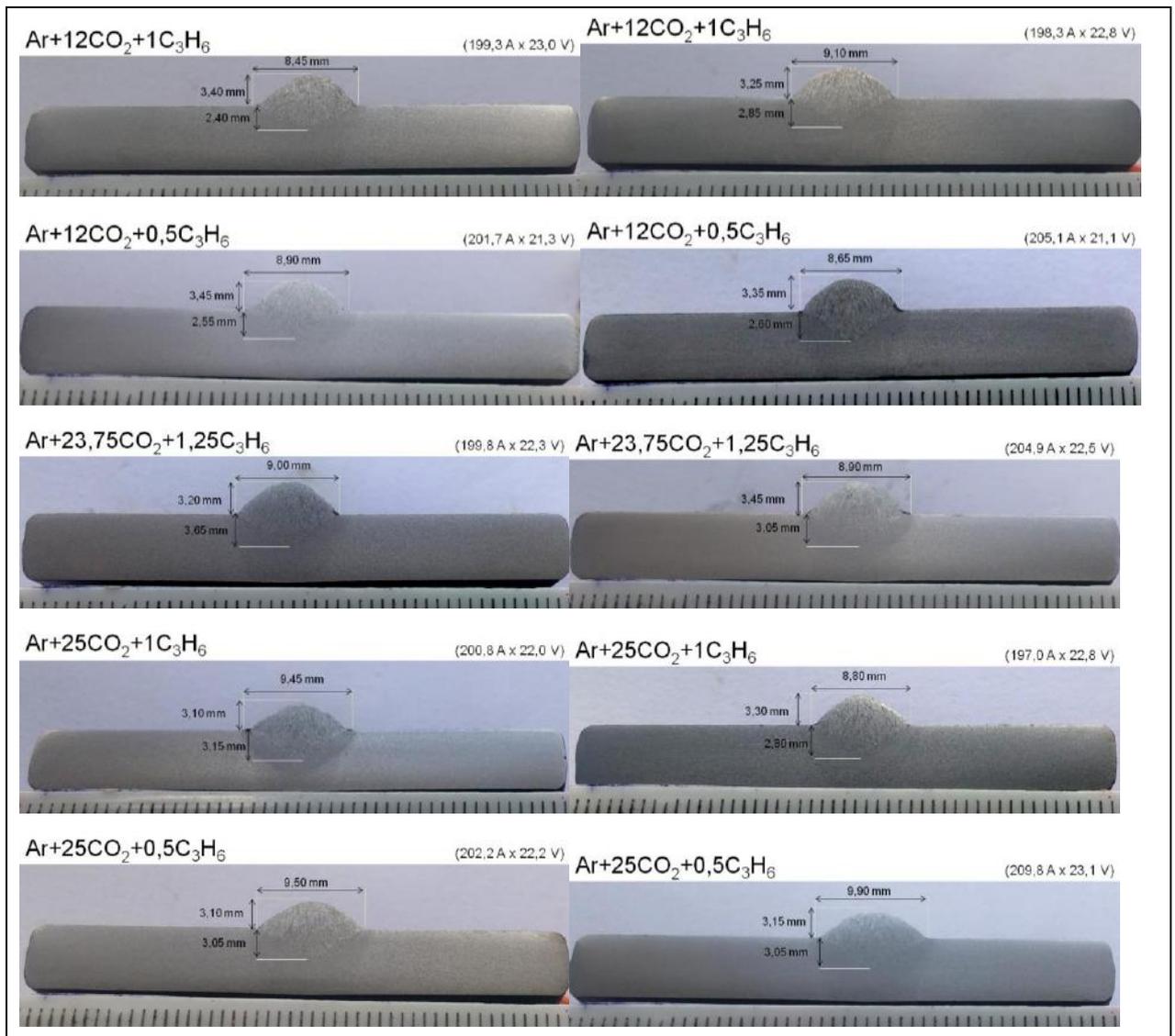


Figura 21: Geometria das soldas em atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+23,75\text{CO}_2+1,25\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ - etapa II.

Na figura 22 são vistas as macrografias das soldas em atmosfera com CO_2 puro e com as adições de propileno. Os valores da largura, reforço e penetração são variados numa atmosfera de proteção, fato atribuído também à regulação dos parâmetros de soldagem.

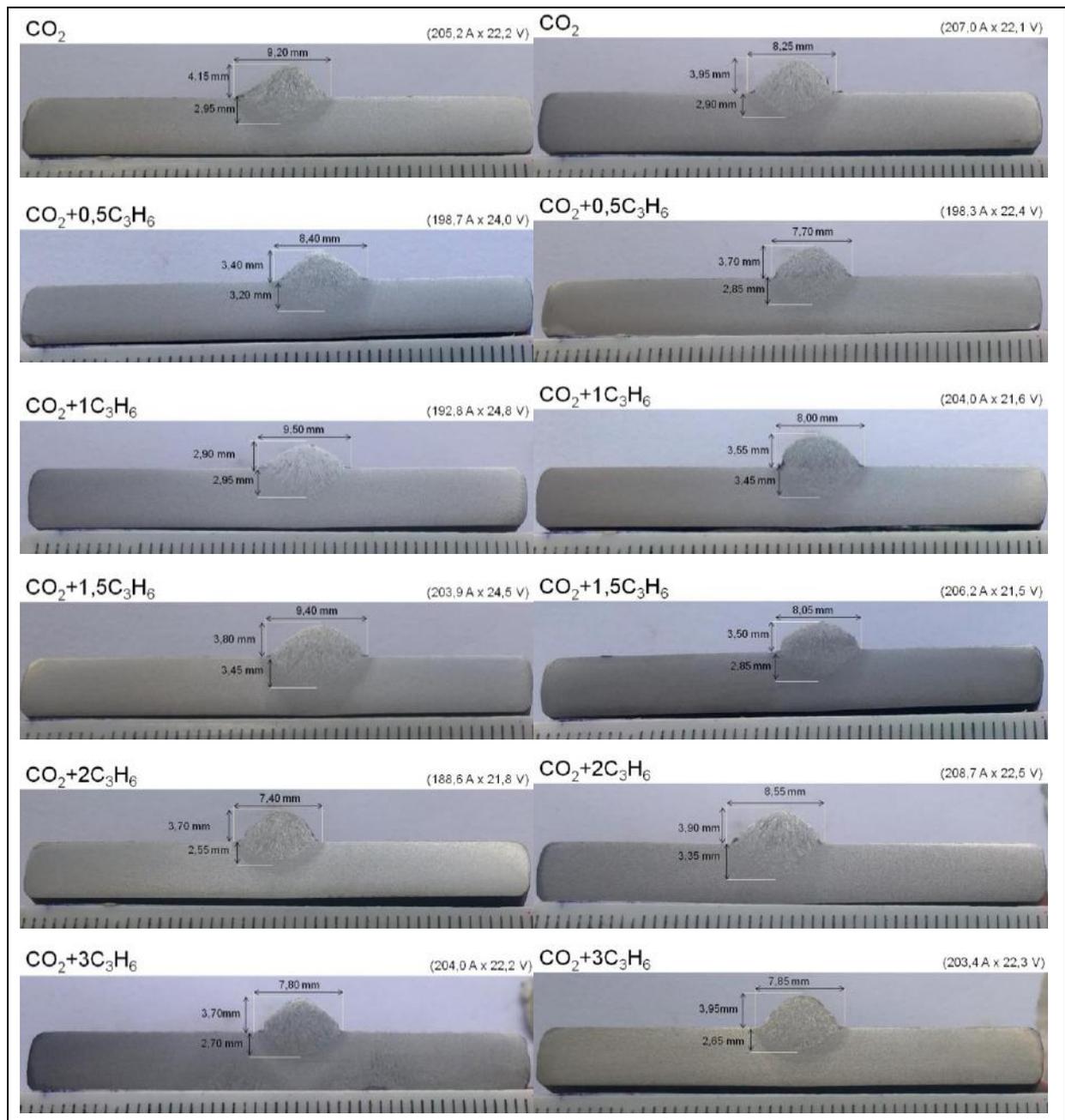


Figura 22: Geometria das soldas em atmosferas CO_2 puro e com adições de propileno - etapa II.

Na figura 23 podem ser vistos os valores da penetração, reforço e largura das soldas nas atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ que são maiores se comparados com os das soldas da etapa I em atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{Ar}+12\text{CO}_2$. Estes resultados foram influenciados pelo maior ajuste de $I \times U$ da etapa II.

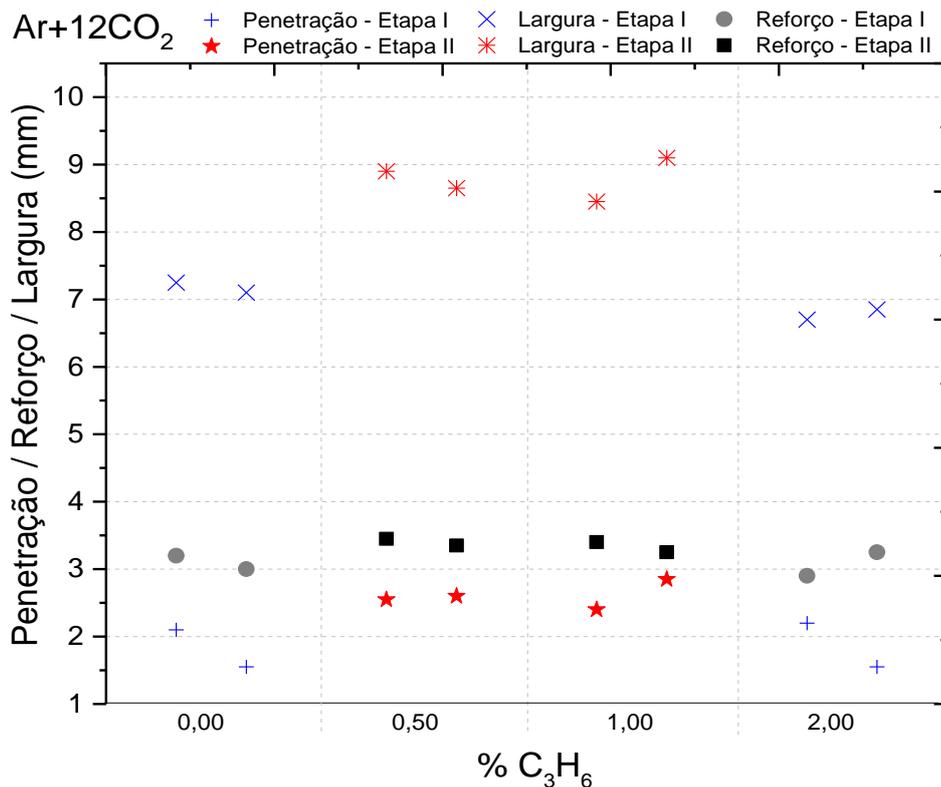


Figura 23: Geometria das soldas nas atmosferas de proteção $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ e com adições de propileno - etapa I e II.

A figura 24 permite a comparação dos valores encontrados na geometria das soldas executadas com atmosferas de proteção $\text{Ar}+23,75\text{CO}_2+1,25\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$, e $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ da etapa II com as da etapa I. Na etapa II também são encontrados nestas atmosferas maiores valores da largura e penetração se comparados com os das soldas da etapa I em atmosfera $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2+3\text{C}_3\text{H}_6$, resultado atribuído à regulagem de maior valor de corrente na etapa II. Os valores do reforço, no entanto, são bem próximos nas duas etapas.

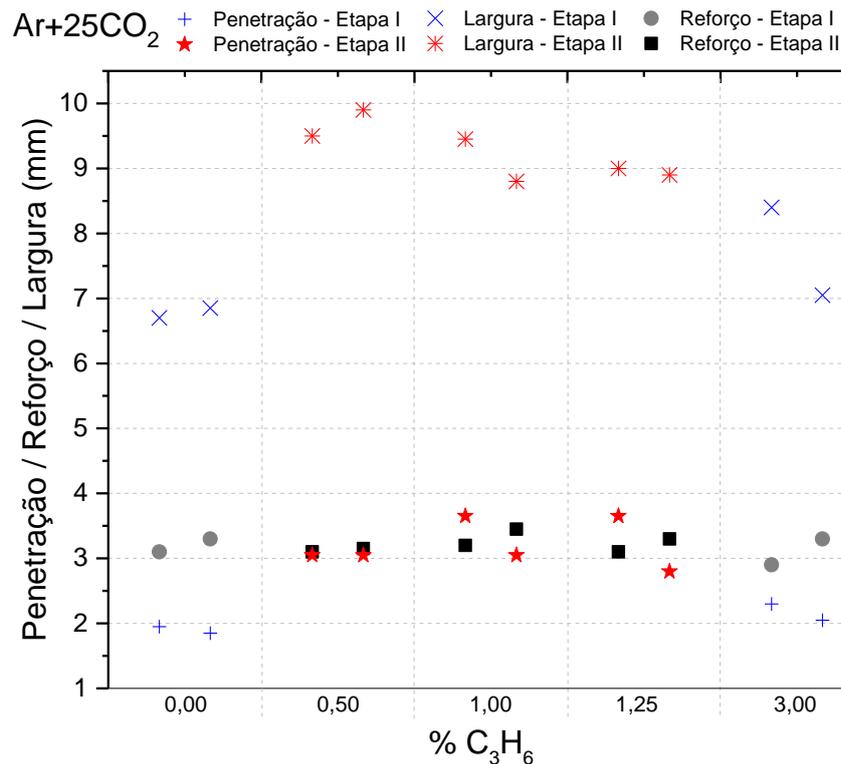


Figura 24: Geometria das soldas nas atmosferas de proteção Ar+23,75CO₂+1,25C₃H₆, Ar+25CO₂+1C₃H₆, e Ar+25CO₂+0,5C₃H₆ - etapa I e II.

Comparando-se na figura 25, as soldas em atmosferas com CO₂ e com adições de propileno da etapa II, percebe-se que numa mesma atmosfera de proteção, a solda realizada com maior I x U apresenta maior valor da largura e penetração. O reforço das soldas com adições de propileno são ligeiramente menores do que das em atmosfera com CO₂. Se comparados os valores medidos das características geométricas percebe-se que todos da etapa II são maiores do que os da etapa I, como consequência da regulação de maior valor de corrente em função da velocidade de alimentação de arame ajustada.

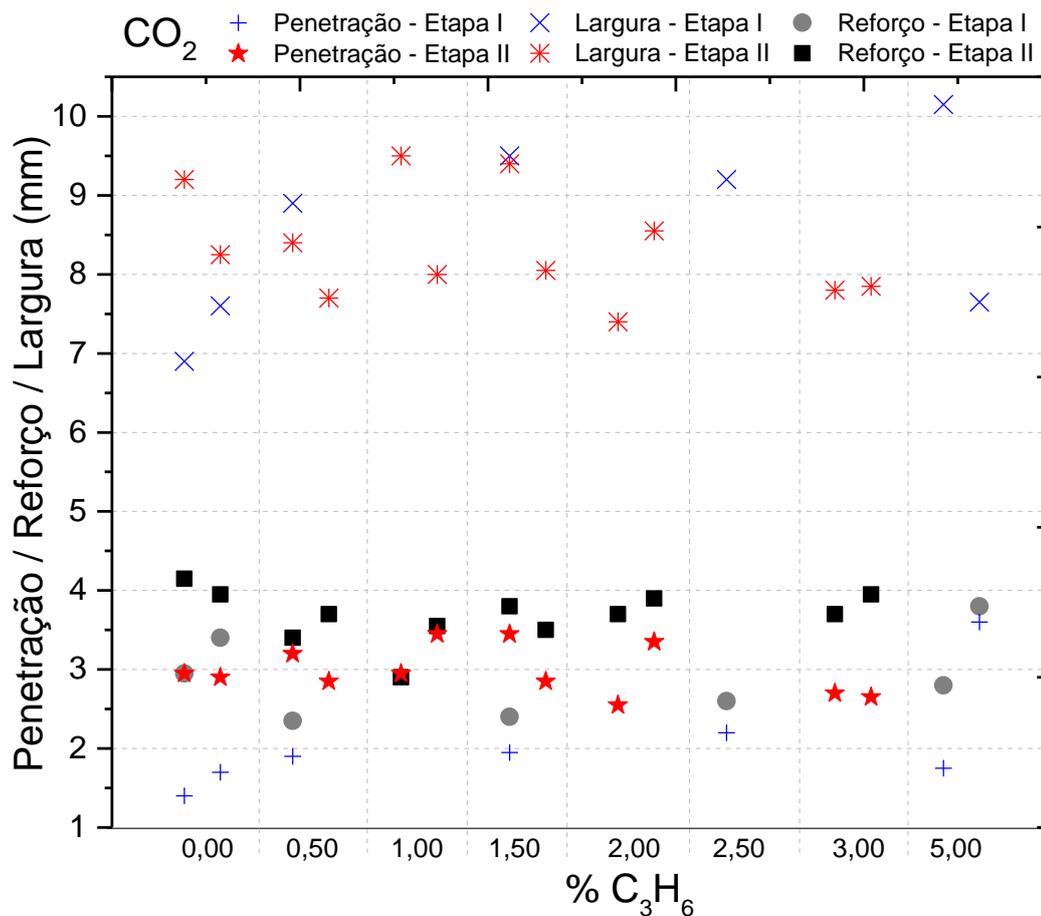


Figura 25: Geometria das soldas nas atmosferas de proteção CO₂ puro e com adições de propileno - etapa I e II.

Os resultados da comparação dos valores da geometria da solda, referentes a largura, penetração e reforço, mostram que a influência maior identificada foi devido a regulagem da I x U. No entanto, também demonstram a influência da atmosfera de proteção utilizada, que foi mais ressaltante nos resultados das soldas obtidas em atmosferas com CO₂ puro em comparação com as executadas nesta atmosfera com adições de propileno.

Ainda associado ao estudo das características geométricas da solda tem-se na tabela 21, os resultados obtidos do IC das soldas da etapa II. Verifica-se pouca variação dos IC nas soldas nas mesmas atmosferas de proteção. Uma tendência de aumento do IC nas soldas em atmosferas com maiores teores de adição de propileno também pode ser observado. As soldas em atmosferas com CO₂ puro e as nesta atmosfera com adições de propileno são as que apresentam maiores valores

do IC. No entanto, a maioria dos IC das soldas em CO₂ com adições de propileno são menores do que das soldas em atmosferas com CO₂ puro.

Tabela 21: IC das soldas - etapa II.

Atmosferas de Proteção	IC (%)		Atmosferas de Proteção	IC (%)	
	CT1	CT2		CT1	CT2
Ar+12CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	38,76	38,73	CO ₂	45,11	47,88
Ar+12CO ₂ +1C ₃ H ₆	40,24	35,71	CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	40,48	48,05
Ar+25CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	32,63	31,82	CO ₂ +1C ₃ H ₆	30,53	44,37
Ar+25CO ₂ +1C ₃ H ₆	32,80	37,50	CO ₂ +1,5C ₃ H ₆	40,42	43,48
Ar+23,75CO ₂ +1,25C ₃ H ₆	35,55	38,76	CO ₂ +2C ₃ H ₆	50,00	45,61
			CO ₂ +3C ₃ H ₆	47,87	47,43

Na figura 26 são mostradas as variações do IC das soldas da etapa I e II. Os IC das soldas na etapa I em atmosferas Ar+12CO₂ e Ar+12CO₂+2C₃H₆ são maiores do que todos os das soldas da etapa II. Nas soldas em Ar+25CO₂ da etapa I o IC é maior se comparado com os das soldas em atmosferas Ar+25CO₂ com adições de propileno na etapa I e II. Esse comportamento se difere quando analisados os IC das soldas em CO₂ puro e com adições de propileno, a regulação de maior valor da corrente na etapa II promoveu um ligeiro aumento dos valores do IC das soldas em CO₂ se comparadas com as da etapa I. Um aumento mais significativo é encontrado nas soldas em atmosferas CO₂ com adições de propileno da etapa II se comparadas com as da etapa I.

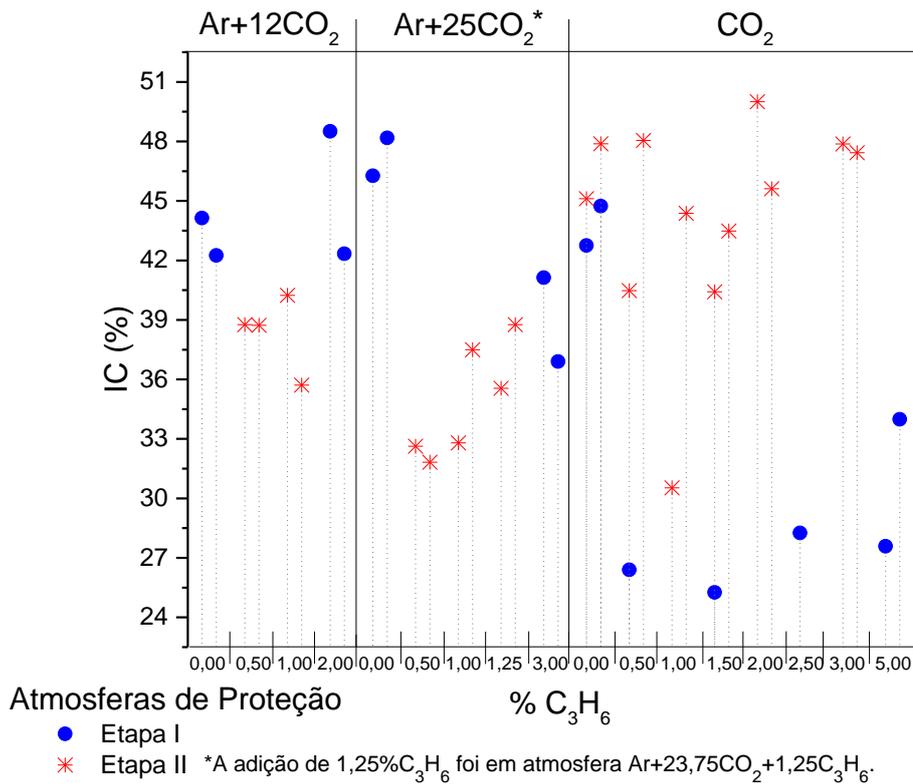


Figura 26: Variações do índice de convexidade das soldas das etapas I e II em função dos teores de C₃H₆ nas atmosferas de proteção.

Na tabela 22 é possível observar uma variação nos valores da Td das soldas, nas atmosferas de proteção em estudo. Se comparadas em geral as maiores Td são das soldas em atmosferas com CO₂ puro, seguidas das nesta atmosfera com adições de propileno. Os menores valores da Td são das soldas em atmosferas Ar+23,75CO₂+1,25C₃H₆, Ar+25CO₂+1C₃H₆ e Ar+25CO₂+0,5C₃H₆, com exceção de um corpo de prova nesta última atmosfera que teve Td igual a 2,770 Kg/h.

Nas figuras 36, 37 e 38 podem ser comparadas as Td em função das atmosferas de proteção utilizadas nas etapas I e II. Percebe-se que na etapa II tem-se um aumento da Td em todas as atmosferas de proteção utilizadas se comparadas as das soldas da etapa I. Esse aumento é atribuído à regulação de maior valor da corrente nesta etapa.

Tabela 22: Taxa de deposição - etapa II.

Gás de Proteção		Peso antes da solda (g)	Peso após limpeza da solda (g)	Metal depositado (g)	Td (kg/h)
Ar+12CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	CT1	496,4	520,2	23,8	2,570
Ar+12CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	CT2	497,0	521,0	24,0	2,630
Ar+12CO ₂ +1C ₃ H ₆	CT1	494,6	518,5	23,9	2,640
Ar+12CO ₂ +1C ₃ H ₆	CT2	497,4	522,4	25,0	2,690
Ar+23,75CO ₂ +1,25C ₃ H ₆	CT1	496,2	519,7	23,5	2,560
Ar+23,75CO ₂ +1,25C ₃ H ₆	CT2	496,2	519,6	23,4	2,530
Ar+25CO ₂ +1C ₃ H ₆	CT1	493,5	517,5	24,0	2,580
Ar+25CO ₂ +1C ₃ H ₆	CT2	497,1	519,1	22,0	2,490
Ar+25CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	CT1	500,3	523,9	23,6	2,560
Ar+25CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	CT2	495,7	521,2	25,5	2,770
CO ₂	CT1	497,8	523,6	25,8	2,902
CO ₂	CT2	495,8	521,4	25,6	2,906
CO ₂ +3C ₃ H ₆	CT1	492,1	510,5	24,9	2,685
CO ₂ +3C ₃ H ₆	CT2	498,9	516,9	25,2	2,785
CO ₂ +2C ₃ H ₆	CT1	494,8	519,7	24,9	2,680
CO ₂ +2C ₃ H ₆	CT2	496,0	521,3	25,3	2,900
CO ₂ +1,5C ₃ H ₆	CT1	494,0	519,2	25,2	2,760
CO ₂ +1,5C ₃ H ₆	CT2	497,2	522,2	25,0	2,812
CO ₂ +1C ₃ H ₆	CT1	491,7	514,4	22,7	2,520
CO ₂ +1C ₃ H ₆	CT2	497,3	522,0	24,7	2,780
CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	CT1	492,4	514,9	22,5	2,737
CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	CT2	497,5	522,7	25,2	2,809

As Td mostradas na figura 27, referente às soldas executadas em atmosferas Ar+12CO₂+0,5C₃H₆ são próximas nos dois corpos de prova. Estes valores foram ligeiramente menores do que das Td em atmosferas Ar+12CO₂+1C₃H₆. Entre os corpos de prova nesta atmosfera também não há grande variação nos valores da Td.

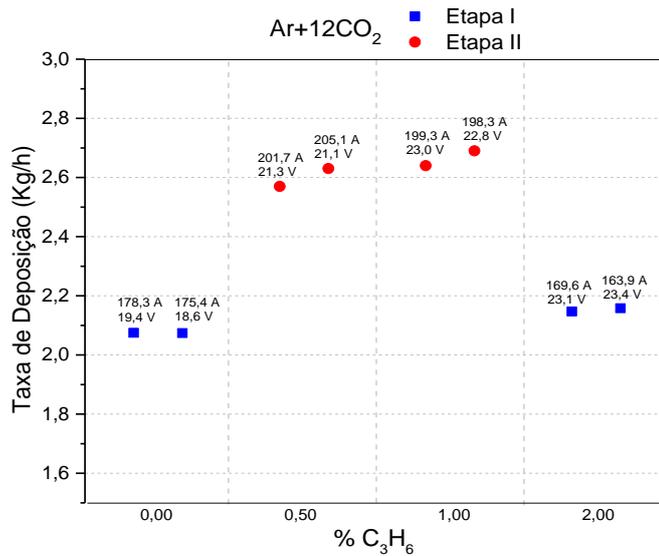


Figura 27: Taxas de deposição das soldas em atmosferas Ar+12CO₂ com adições de propileno - etapa I e II.

As Td das soldas nas atmosferas Ar+25CO₂+0,5C₃H₆, Ar+25CO₂+1C₃H₆ e Ar+23,75CO₂+1,25C₃H₆ são mostradas na figura 28. Estas apresentam valores bem próximos, com exceção do segundo corpo de prova na soldagem em atmosfera Ar+25CO₂+0,5C₃H₆ que apresenta maior Td. Esse maior valor pode ser atribuído a regulagem de maior valor de corrente e tensão na soldagem.

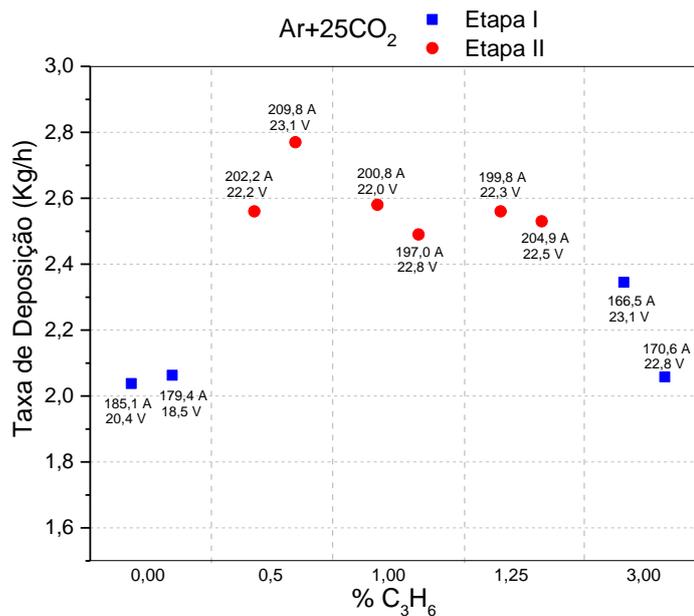


Figura 28: Taxas de deposição das soldas em atmosferas Ar+25CO₂ com adições de propileno - etapa I e II.

Na figura 29 podem ser vistos os valores das soldas em atmosferas com CO_2 e com adições de propileno. A Td dos dois corpos de prova soldados em atmosferas CO_2 são bem próximos. Essas Td são maiores do que das soldas em atmosferas com adições de propileno. A Td das soldas em $\text{CO}_2+3\text{C}_3\text{H}_6$ apresentam pouca diferença, sendo o maior valor observado na solda do segundo corpo de prova.

A Td das soldas em atmosfera $\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$ se diferenciam, sendo o maior valor encontrado na solda do segundo corpo de prova. Este apresenta média maior da corrente de soldagem.

Em atmosfera $\text{CO}_2+1,5\text{C}_3\text{H}_6$ as soldas apresentam valores da Td bem próximos, sendo o maior encontrado na segunda chapa de teste soldada.

Na atmosfera $\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ a maior Td foi da solda do segundo corpo de prova. Nesta solda a corrente média foi maior. A Td das soldas em atmosferas $\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ tem valores próximos.

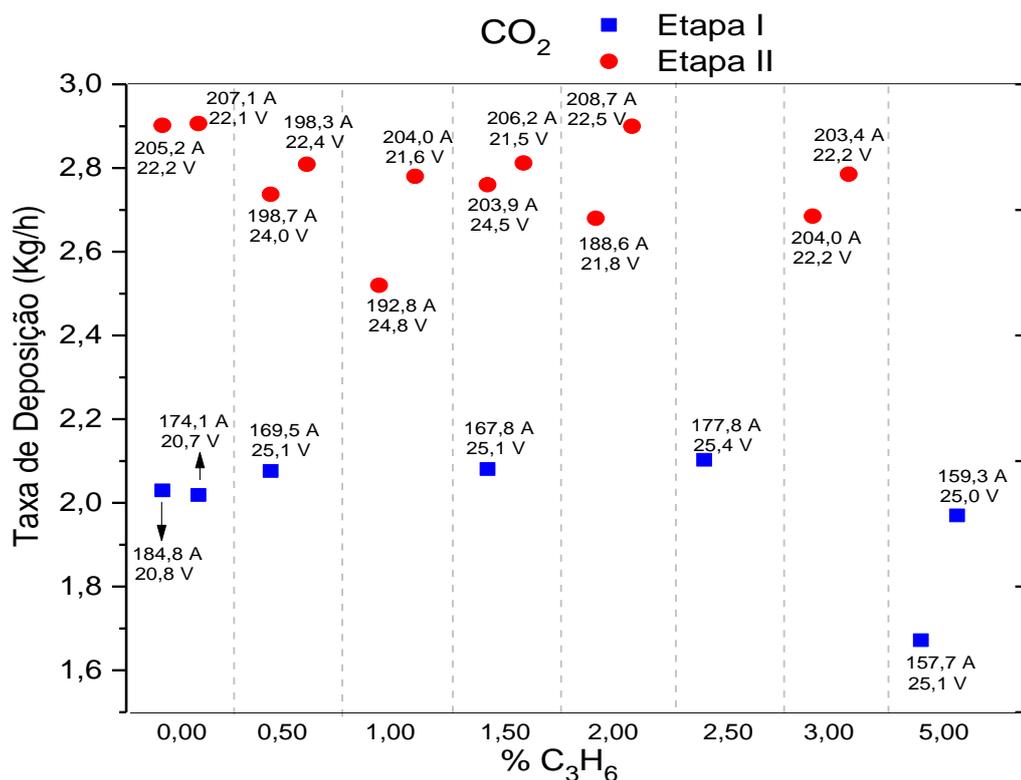


Figura 29: Taxas de deposição das soldas em atmosferas CO_2 com adições de propileno - etapa I e II.

Como resultado da comparação dos valores das Td das soldas da etapa I e II se atribuí a corrente como parâmetro determinante, ou seja: maior corrente, maior

Td (Suban e Tušek, 2001). No entanto pode-se estimar que a soldagem com o uso de adições de propileno nas atmosferas de proteção não prejudicou a Td, tendo em vista que em alguns teores de adições, foram obtidas soldas com Td de deposição próximas ou maiores do que as obtidas nas soldas em atmosferas convencionais.

4.2.2 Repetitividade da Transferência Metálica

Na tabela 23 são mostrados os índices utilizados nesta etapa para análise da repetitividade da transferência: média dos tempos de arco aberto (t_{ab}), média dos tempos de curtos-circuitos (t_{cc}), média dos períodos de transferências (P), desvio padrão dos períodos de arco aberto (DPAA), desvio padrão dos períodos de curtos-circuitos (DPCC).

Tabela 23: Resultados dos índices média dos tempos de arco aberto (t_{ab}), média dos tempos de curto-circuito (t_{cc}), média dos períodos de transferências (P), desvio padrão dos períodos de arco aberto (DPAA), desvio padrão dos períodos de curto-circuito (DPCC) - etapa II.

Atmosferas de Proteção	t_{ab} (ms)		t_{cc} (ms)		P (ms)		DPAA (ms)		DPCC (ms)	
	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2	CT1	CT2
Ar+12CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	15,9	11,3	2,9	3,0	18,8	14,3	9,5	6,6	2,4	2,2
Ar+12CO ₂ +1C ₃ H ₆	16,4	12,9	4,1	2,8	20,5	15,7	9,0	7,0	2,9	1,8
Ar+25CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	13,5	15,0	2,3	2,4	15,7	17,4	8,5	9,5	1,8	1,9
Ar+25CO ₂ +1C ₃ H ₆	14,1	17,1	3,0	3,6	17,1	20,7	7,8	9,3	2,2	2,6
Ar+23,75CO ₂ +1,25C ₃ H ₆	14,3	15,9	3,0	3,3	17,3	19,1	9,3	9,5	2,3	2,5
CO ₂	20,2	18,9	7,3	7,4	27,5	26,4	9,2	7,7	3,8	3,4
CO ₂ +0,5C ₃ H ₆	25,2	18,6	6,3	6,5	31,5	25,1	9,5	8,8	2,9	3,4
CO ₂ +1C ₃ H ₆	21,7	16,2	4,6	6,0	26,3	22,2	10,1	7,1	2,4	3,0
CO ₂ +1,5C ₃ H ₆	20,6	13,4	4,8	5,0	25,3	18,4	10,9	7,5	2,8	3,2
CO ₂ +2C ₃ H ₆	25,8	17,9	9,0	6,2	34,8	24,1	7,3	8,0	3,1	3,1
CO ₂ +3C ₃ H ₆	22,3	24,9	7,8	9,0	30,1	33,9	5,9	6,0	2,8	2,9

Na figura 30 são mostrados os valores da t_{cc} e t_{ab} plotados em função dos teores de C₃H₆ nas atmosferas utilizadas, nas soldagens das etapas I e II. É possível identificar que os valores da t_{cc} numa mesma atmosfera de proteção tem pouca variação, mostrando maior sensibilidade à atmosfera de proteção utilizada. O t_{ab} dos corpos de prova numa mesma atmosfera tem uma variação maior. Em geral os valores das t_{cc} e t_{ab} são maiores na etapa II, aumento atribuído à regulagem de

maiores valores de corrente. No trabalho de Souza *et al.*, (2011) é mostrado que a influência da tensão de soldagem na regularidade da transferência reside na proporcionalidade desta com o comprimento de arco. Nesta etapa embora sejam utilizadas correntes com valores mais próximos a variação da tensão de soldagem em algumas soldas contribui para diferença dos resultados tanto entre as chapas soldadas na etapa II quanto se comparadas com as da etapa I.

Pode ser visto, na figura 30, que na etapa II as chapas de teste soldadas em $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ apresentam valores da t_{cc} bem próximos e quando comparados com os das soldas em $\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ são menores do que o encontrado na soldagem de um corpo de prova, pois nesta atmosfera houve variação entre os resultados das soldas. Se comparadas as t_{cc} da etapa II com as das soldas da etapa I, estas são ligeiramente menores.

Adições de teores menores de propileno na atmosfera $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ propiciou uma diminuição do tempo de transferência da gota. A t_{ab} das soldas nestas atmosferas da etapa II são próximas das obtidas nas soldas da etapa I em atmosfera $\text{Ar}+12\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$, maiores do que as em atmosfera $\text{Ar}+12\text{CO}_2$.

As soldas da etapa II, em atmosfera $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ apresentam valores das t_{ab} parecidas e menores t_{cc} se comparadas com as das soldas em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{Ar}+23,75\text{CO}_2+1,25\text{C}_3\text{H}_6$.

As soldas realizadas em atmosfera com CO_2 puro na etapa II apresentam maior t_{cc} se comparadas com as em $\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{CO}_2+1,5\text{C}_3\text{H}_6$. Nestes teores as adições com menor valor foi da solda em $\text{CO}_2+1,5\text{C}_3\text{H}_6$. As t_{cc} das soldas em atmosferas $\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{CO}_2+3\text{C}_3\text{H}_6$ indicam que estes teores tendem a aumentar o t_{cc} .

Em relação a análise da t_{ab} das soldas em atmosferas com CO_2 puro e com adições de propileno, pode-se observar que numa mesma atmosfera de proteção os maiores valores da t_{ab} são das soldas executadas com maior regulagem da tensão. A exceção são os resultados da soldagem em atmosfera $\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$ que apresentam maior t_{ab} na regulagem de maior valor da corrente.

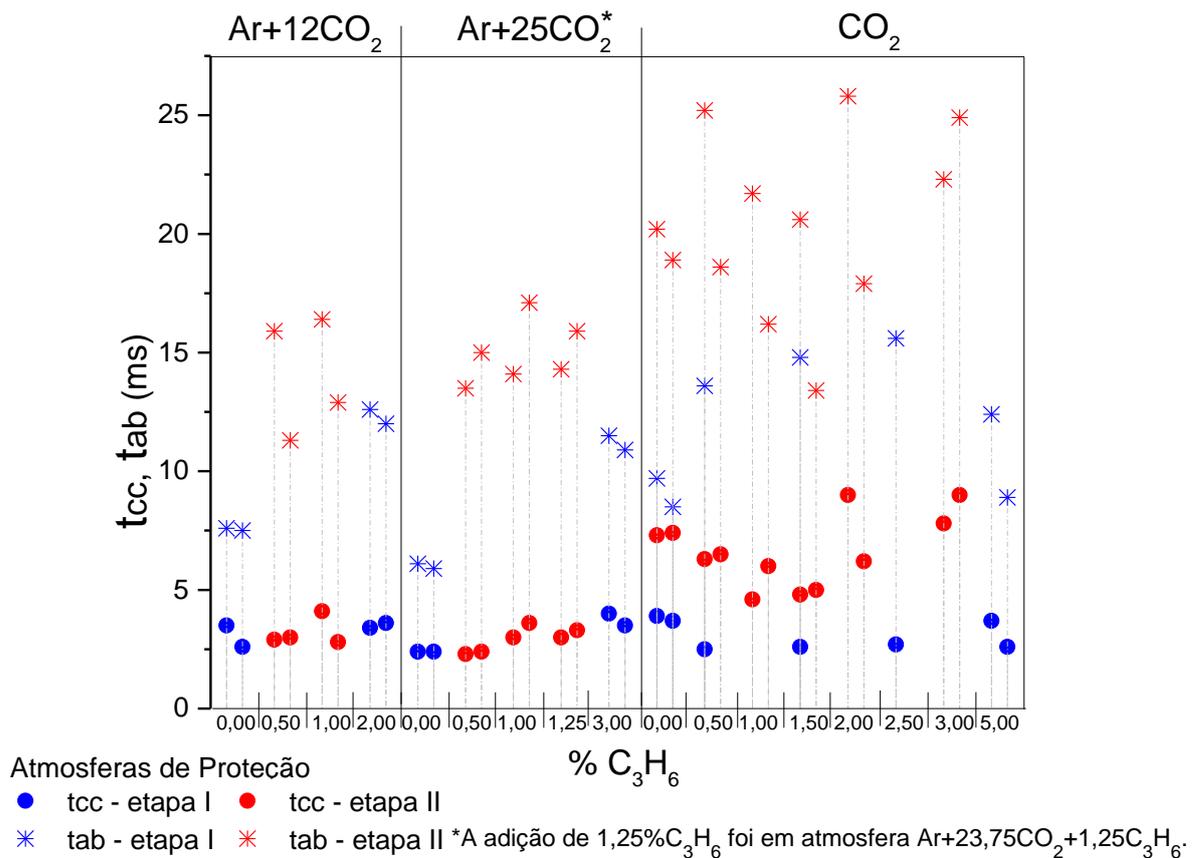


Figura 30: Variação do tcc e tab em função da adição de propileno nas atmosferas de proteção - etapa I e II.

As variações da média dos períodos de transferências (P) nas soldas executadas nas atmosferas de proteção da etapa I e II podem ser melhor observadas nos gráficos da figura 31. Nesta é possível observar também a variação do desvio padrão de arco aberto (DPAA) e de curto circuito (DPCC). Embora se observe a influência da regulagem de maior valor de corrente nos resultados destes índices é possível verificar também que são influenciados pelas atmosferas de proteção utilizadas, principalmente a P e o DPCC complementando os resultados do DPAA que mostram a influência maior da regulagem dos parâmetros numa mesma atmosfera de proteção.

Na figura 31, se analisados os resultados do período de transferências da etapa I e II é possível observar maiores valores na etapa II. Outro aspecto geral é que os valores dos DPAA e DPCC das soldas realizadas em algumas atmosferas na etapa I e II são próximos.

Comparando-se a P, o DPAA e o DPCC das soldas em $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ com $\text{Ar}+12\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ são encontrados valores próximos.

As soldas em atmosferas $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{Ar}+23,75\text{CO}_2+1,25\text{C}_3\text{H}_6$ tem valores da P e do DPAA próximos. São observadas diferenças no DPCC, que tende a aumentar com o aumento do teor de adição de propileno na atmosfera.

Na etapa II a P das soldas em CO_2 puro é maior do que o segundo corpo de prova soldado em $\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$, dos soldados em $\text{CO}_2+1\text{C}_3\text{H}_6$ e do segundo corpo de prova soldado em $\text{CO}_2+2\text{C}_3\text{H}_6$. Se comparados os DPCC das soldas em atmosferas com adição de propileno com as em CO_2 puro identifica-se que estas tem valores menores de dispersão, com exceção de um corpo de prova soldado em $\text{CO}_2+0,5\text{C}_3\text{H}_6$ que apresentou o mesmo desvio da solda em CO_2 puro.

Semelhante ao observado na análise dos cordões de solda, executados nas etapas I e II, identifica-se no estudo da repetitividade da transferência, que embora o ajuste de corrente e tensão de soldagem tenha sido significativo nos resultados, as adições de propileno, em teores adequados podem ter contribuído com as alterações dos t_{ab} e t_{cc} . Sendo mais perceptíveis nas soldas em atmosferas com CO_2 puro se comparadas com os resultados das adições em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2$.

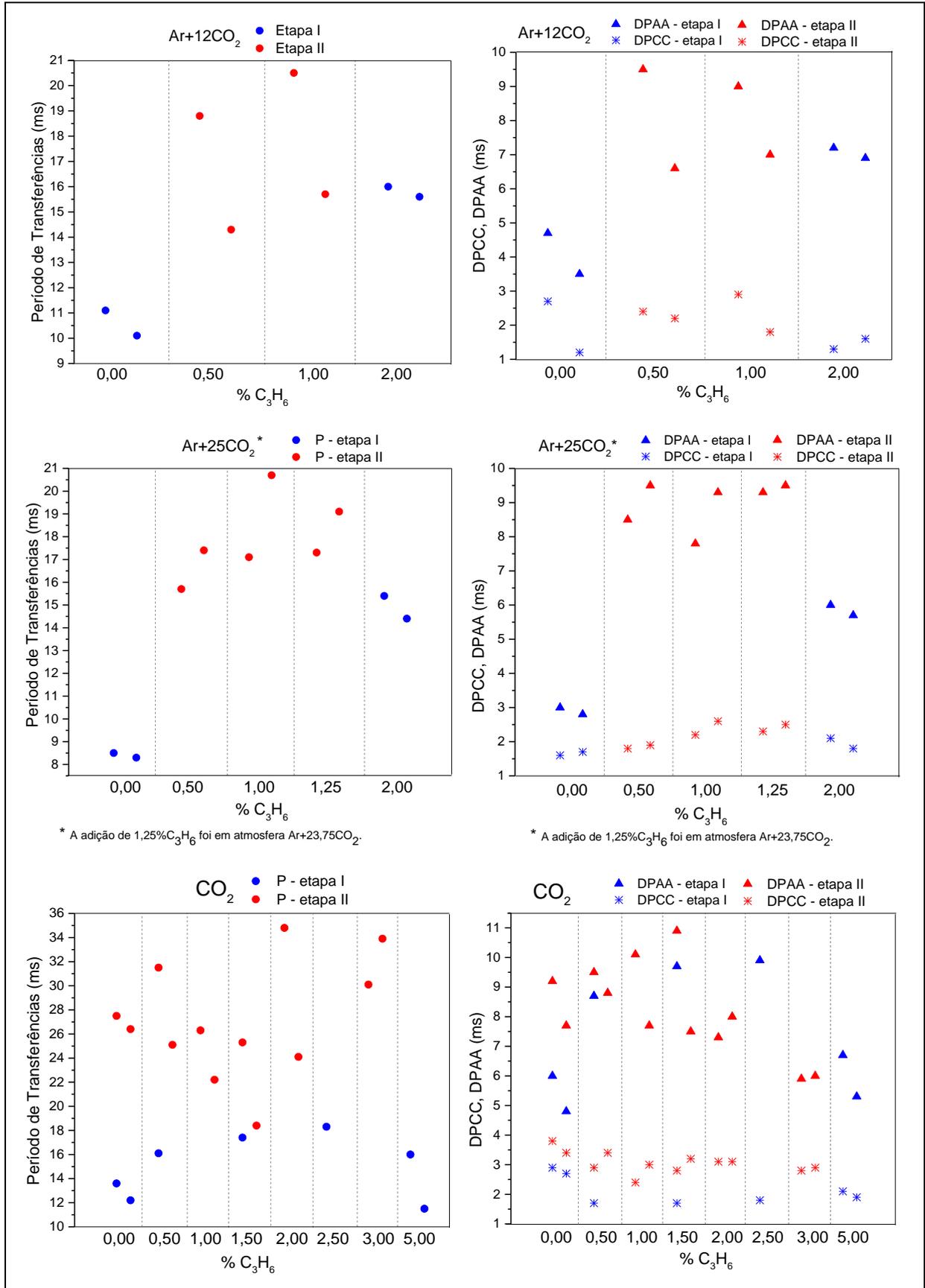


Figura 31: Período de Transferências, desvio padrão do período de curto circuito e desvio padrão do período de arco aberto em função das adições de C₃H₆ nas atmosferas de proteção das etapas I e II.

4.2.3 Considerações Finais

- A diminuição da tensão utilizada se comparada com a da etapa I se mostrou mais proporcional mesmo com o aumento da corrente utilizada. Resultando em cordões de solda com um perfil geométrico com maior penetração e reforço de todas as soldas se comparadas com as obtidas na etapa I. Também foram obtidas maiores taxas de deposição das soldas na etapa II se comparadas com as da etapa I como consequência dos parâmetros $I \times U$ ajustados. Os maiores valores para a faixa de corrente utilizada mostraram-se mais adequados tanto para soldagem com CO_2 puro quanto para nas atmosferas com adições do gás combustível propileno nas chapas de teste estudadas. Os valores de tensão foram próximos a 22 V.
- Soldas adequadas foram obtidas em atmosferas com no máximo 1% de propileno adicionado nas atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2$.
- Identifica-se que nas atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ os resultados melhores na avaliação dos cordões de solda e da repetitividade da transferência metálica foram obtidos nas soldas em que foram adicionados um teor de 0,5% de propileno. Em CO_2 puro os resultados das soldas melhores foram com adição do teor de 1,5% de propileno.
- O aparecimento de poros nas soldas em atmosferas de proteção $\text{CO}_2+3\text{C}_3\text{H}_6$ sugerem a possibilidade de soldagem do aço carbono com adições em até 2,5% de C_3H_6 , nesta atmosfera devido ao bom resultado obtido na etapa I.
- A variação dos teores de adição de propileno nas atmosferas permitiu identificar a influência dos parâmetros $I \times U$ nos resultados dos critérios e índices utilizados no estudo da estabilidade. Por isto, na próxima etapa serão realizadas soldagens nas mesmas atmosferas e com regulagens de $I \times U$ próximas, para reduzir sua influência nos resultados.
- Os teores de adição de propileno nas atmosferas de proteção para soldagem na próxima etapa são 0,4% em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$, 0,6% em $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ e 1,3% em CO_2 .

4.3 Etapa III: Comparação da Estabilidade do Processo GMAW em Atmosferas de Proteção Convencionais e com Adições do Gás Combustível Propileno

Nas etapas I e II, a soldagem nas atmosferas de proteção com adições do gás combustível propileno nas misturas convencionais, permitiu a identificação das condições operacionais, não necessariamente de melhor estabilidade, para obtenção de soldas de qualidade adequada se comparadas as executadas em Ar+12CO₂, Ar+25CO₂, e CO₂.

As atmosferas de proteção com os teores de adição de propileno Ar+12CO₂+0,4C₃H₆, Ar+25CO₂+0,6C₃H₆, CO₂+1,3C₃H₆ foram selecionadas devido serem próximos dos teores das soldas com melhores resultados na análise dos cordões soldados e da repetitividade da transferência metálica quando comparadas às soldas nas atmosferas de proteção convencionais.

Nesta etapa, para comparação da influência da atmosfera de proteção com adição do gás combustível propileno em relação à atmosfera convencional, foram utilizadas duas regulagens de I x U:

- i) Ajuste 1: 175,0 ± 8,1 A / 18,9 ± 0,2 V.
- ii) Ajuste 2: 208,3 ± 3,8 A / 21,9 ± 1,4 V.

As comparações dos resultados ao longo do texto serão sempre entre as soldas em atmosfera com adição de propileno num mesmo ajuste com as em atmosfera convencional. Também serão comparadas em relação ao ajuste numa mesma atmosfera de proteção. Espera-se diminuir a influência desses parâmetros nos critérios e índices de estabilidade.

De forma geral a estabilidade é associada a maior repetitividade do funcionamento do processo por isso para análise da influência do propileno nas atmosferas de proteção são utilizados os critérios e índices objetivando um aprofundamento do estudo feito nas etapas I e II.

Os valores registrados da I x U, na soldagem em que foram feitas adições nas atmosferas convencionais, podem ser relacionadas com a estabilidade do arco, já que possibilitam, devido à manutenção dos outros parâmetros, verificar a influência das atmosferas de proteção utilizadas.

As formas de onda da I x U de soldagem, em função do tempo, fornecem os índices que permitem uma estimativa da estabilidade do arco associada a da transferência. A I x U promove o desequilíbrio entre as várias forças, que atuam

sobre as gotas podendo favorecer ou não a geração de respingos, conforme discutido no trabalho de Kang *et al.*, (2003) sobre a estimativa da taxa de respingos, na soldagem GMAW. A tocha com deslocamento mecanizado permitiu manter praticamente constante o comprimento do arco, durante a deposição da solda na etapa III, se analisado em função da tensão utilizada e da corrente. Scotti e Ponomarev (2014) consideram o comprimento do arco junto com a corrente de soldagem, os dois parâmetros mais importantes do processo. A constância do comprimento do arco é que mantém a estabilidade da transferência de calor. Entretanto, como a tensão é proporcional ao comprimento de arco, e como o comprimento do arco é difícil de se medir, muitas vezes se faz referência à tensão como parâmetro que governa o processo.

Na tabela 24 é mostrado os valores médios captados pelo SAPV4 da velocidade de alimentação de arame, I e U em cada atmosfera de proteção. No ajuste 1 foram soldadas duas chapas de teste em atmosferas de proteção convencionais e três em atmosferas com adição de propileno. No ajuste 2 foram soldadas três chapas de teste nas atmosferas com e sem adição de C_3H_6 .

Tabela 24: Regulagem da corrente e tensão durante a soldagem - etapa III.

ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	Velocidade de alimentação de arame			Corrente média registrada no SAP(A)			Tensão média registrada no SAP(A)		
	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3
Ajuste 1									
Ar+12CO ₂	4,2	4,4	-	174,9	172,4	-	18,7	18,8	-
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	4,1	4,0	3,8	175,9	183,1	170,5	18,8	19,0	18,6
Ar+25CO ₂	4,5	4,6	-	178,5	166,9	-	18,7	18,8	-
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	4,1	3,8	3,9	176,2	176,1	177,0	19,0	18,6	18,5
CO ₂	4,6	4,9	-	179,7	170,0	-	19,0	18,8	-
CO ₂ +1,3C ₃ H ₆	4,4	4,2	4,0	172,1	170,4	170,3	18,8	19,1	18,5
Ajuste 2									
Ar+12CO ₂	4,8	4,8	4,9	209,9	208,9	209,4	21,1	21,0	21,1
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	4,9	5,0	4,9	208,4	208,8	205,5	21,0	21,1	21,1
Ar+25CO ₂	5,0	5,0	5,0	208,5	206,1	208,2	20,9	20,8	20,8
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	5,1	5,1	5,0	208,8	212,1	211,9	21,0	20,8	20,9
CO ₂	5,4	5,3	5,3	211,1	211,6	204,5	23,3	23,3	22,7
CO ₂ +1,3C ₃ H ₆	5,1	5,4	5,2	210,8	208,3	211,5	23,0	23,1	23,1

A figura 32 mostra o ajuste da tensão em função das correntes utilizadas. O gráfico apresenta o aspecto proporcional, que é previsto para relação entre os parâmetros, associados a soldas com boa estabilidade do arco (ESAB, 2005; Modenesi, 2009). As médias obtidas foram bem próximas na soldagem em todas as atmosferas no ajuste 1. No ajuste 2 em cada atmosfera de proteção, os valores médio de $I \times U$ foram:

- i) Ar+12CO₂ e Ar+12CO₂+0,4C₃H₆: corrente $206,6 \pm 1,1$ A; tensão $21,05 \pm 0,05$ V;
- ii) Ar+25CO₂ e Ar+25CO₂+0,6C₃H₆: corrente $209,0 \pm 3,0$ A e tensão $20,90 \pm 0,10$ V;
- iii) CO₂ e CO₂+1,3C₃H₆: corrente $208,0 \pm 3,6$ A e tensão $23,00 \pm 0,30$ V.

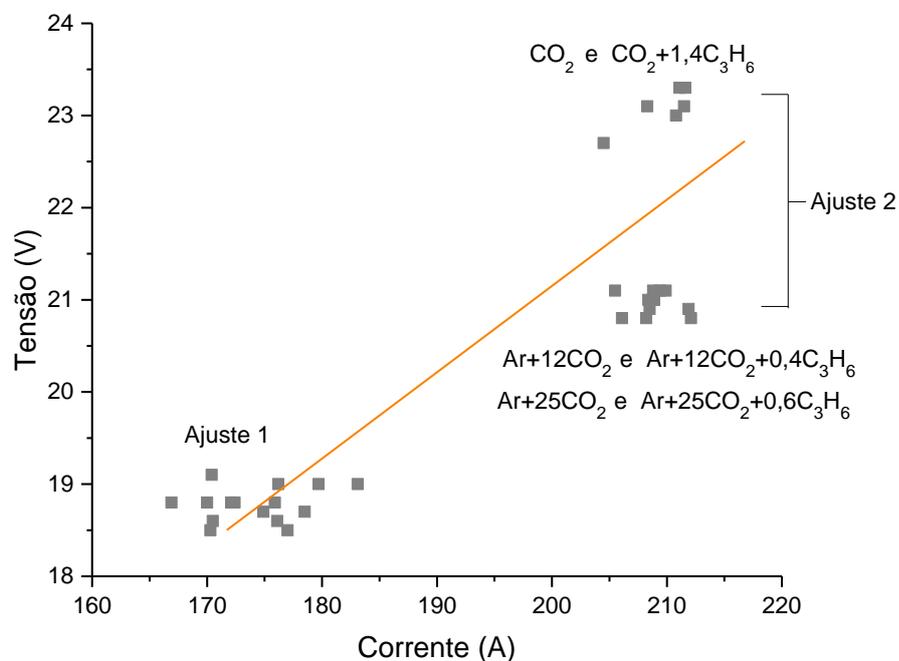


Figura 32: Variação dos valores médios de $I \times U$ das soldas nas atmosferas de proteção - etapa III.

4.3.1. Cordões de Solda

4.3.1.1 Inspeção Visual e Líquido Penetrante

Na inspeção visual, das chapas de teste soldadas nesta etapa, foram identificados nos dois ajustes de I x U:

- Bom acabamento do cordão e ausência de descontinuidades superficiais grosseiras;
- Nas atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ os cordões tem aspecto mais brilhante, um acabamento superficial mais uniforme ao longo do cordão e aparente diminuição da formação de respingos se comparados aos soldados em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ e CO_2 .
- Nos cordões realizados com o ajuste 2, é mais perceptível a presença de escória.
- Todas as soldas foram aprovadas no ensaio de LP.

Nas tabelas 25, 26, 27, 28, 29, 30 são apresentados os registros fotográficos das chapas de teste como soldado, soldado após limpeza e após ensaio de LP, nos dois ajustes de I x U.

Tabela 25: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas $Ar+12CO_2$ e $Ar+12CO_2+0,4C_3H_6$, no ajuste 1 - etapa III.

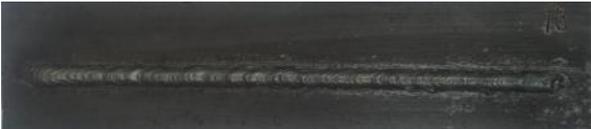
ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	CT	Chapa Soldada	Após limpeza
$Ar+12CO_2$	1		
	2		
$Ar+12CO_2+0,4C_3H_6$	1		
	2		
	3		

Tabela 26: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas Ar+12CO₂ e Ar+12CO₂+0,4C₃H₆, no ajuste 2 - etapa III.

ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	CT	Chapa Soldada	Após limpeza
Ar+12CO ₂	1		
	2		
	3		
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	1		
	2		
	3		

Tabela 27: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas Ar+25CO₂ e Ar+25CO₂+0,6C₃H₆, no ajuste 1 - etapa III.

ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	CT	Chapa Soldada	Após limpeza
Ar+25CO ₂	1		
	2		
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	1		
	2		
	3		

Tabela 28: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas Ar+25CO₂ e Ar+25CO₂+0,6C₃H₆, no ajuste 2 - etapa III.

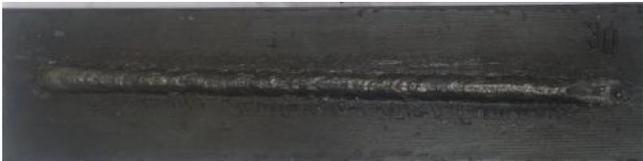
ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	CT	Chapa Soldada	Após limpeza
Ar+25CO ₂	1		
	2		
	3		
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	1		
	2		
	3		

Tabela 29: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$, no ajuste 1 - etapa III.

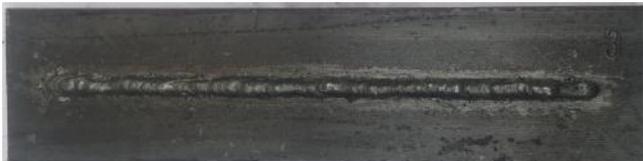
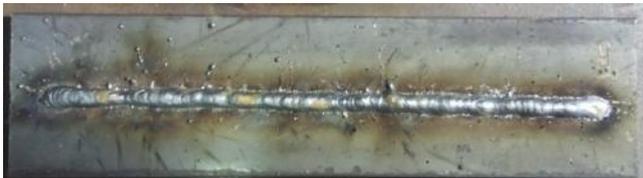
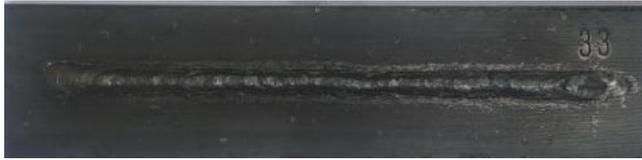
ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	CT	Chapa Soldada	Após limpeza
CO_2	1		
	2		
$\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$	1		
	2		
	3		

Tabela 30: Aspectos das soldas nas condições: após soldagem e soldagem após limpeza, em atmosferas CO_2 e $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$, no ajuste 2 - etapa III.

ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	CT	Chapa Soldada	Após limpeza
CO_2	1		
	2		
	3		
$\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$	1		
	2		
	3		

4.3.1.2 Características Geométricas

Nas tabelas 31 e 32 estão as macrografias das soldas com a identificação dos valores medidos da largura, reforço e penetração. Nestas é observada uma semelhança entre o perfil de penetração das soldas obtidas nas diferentes atmosferas de proteção. A forma da penetração apresenta-se centralizada em relação à distribuição da largura. Não foram identificados poros e trincas na parte interna.

Na figura 33 é mostrada a variação da largura, penetração, reforço e do IC em função tanto do ajuste de I x U quanto das atmosferas de proteção. Comparando os resultados das soldas nas atmosferas com adição de propileno com as executadas em atmosferas convencionais, pode ser visto que:

No ajuste 1:

- Em $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas às soldas em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ foram obtidos, valores próximos de penetração, menor reforço, menor largura e menor IC.
- Em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas às soldas em $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ são obtidos maior penetração e largura, menor reforço e IC.
- Em $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas às soldas em CO_2 são obtidos menor penetração e largura, maior reforço e IC.

No ajuste 2:

- Em $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas às soldas em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ são obtidos maior penetração e reforço, menor largura, maior IC.
- Em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas as soldas em $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ são obtidos menor penetração, semelhança do reforço, maior largura e menor IC.
- Em $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas às soldas em CO_2 são obtidos penetração semelhante, maior reforço, menor largura e maior IC.

De forma geral, a penetração e a largura de todas as soldas aumentaram em função do ajuste 2, onde foram utilizadas maior corrente e tensão de soldagem. O reforço não sofreu alteração significativa tanto em função da variação da atmosfera de proteção, quanto do ajuste de IxU. O IC se mostra menor nas soldas executadas no ajuste 2.

Tabela 31: Macrografias das soldas no ajuste 1 - etapa III.

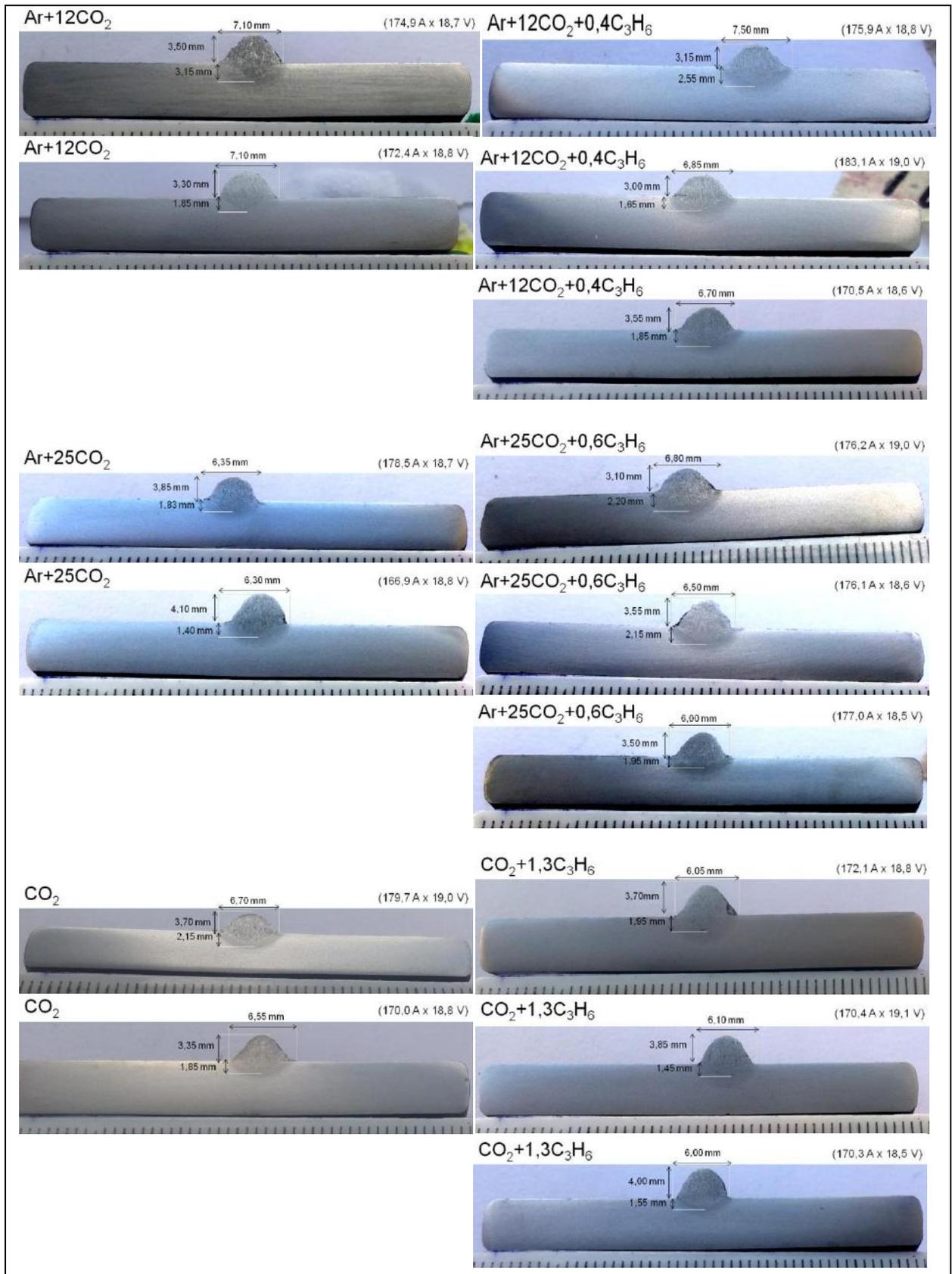


Tabela 32: Macrografias das soldas no ajuste 2 - etapa III.



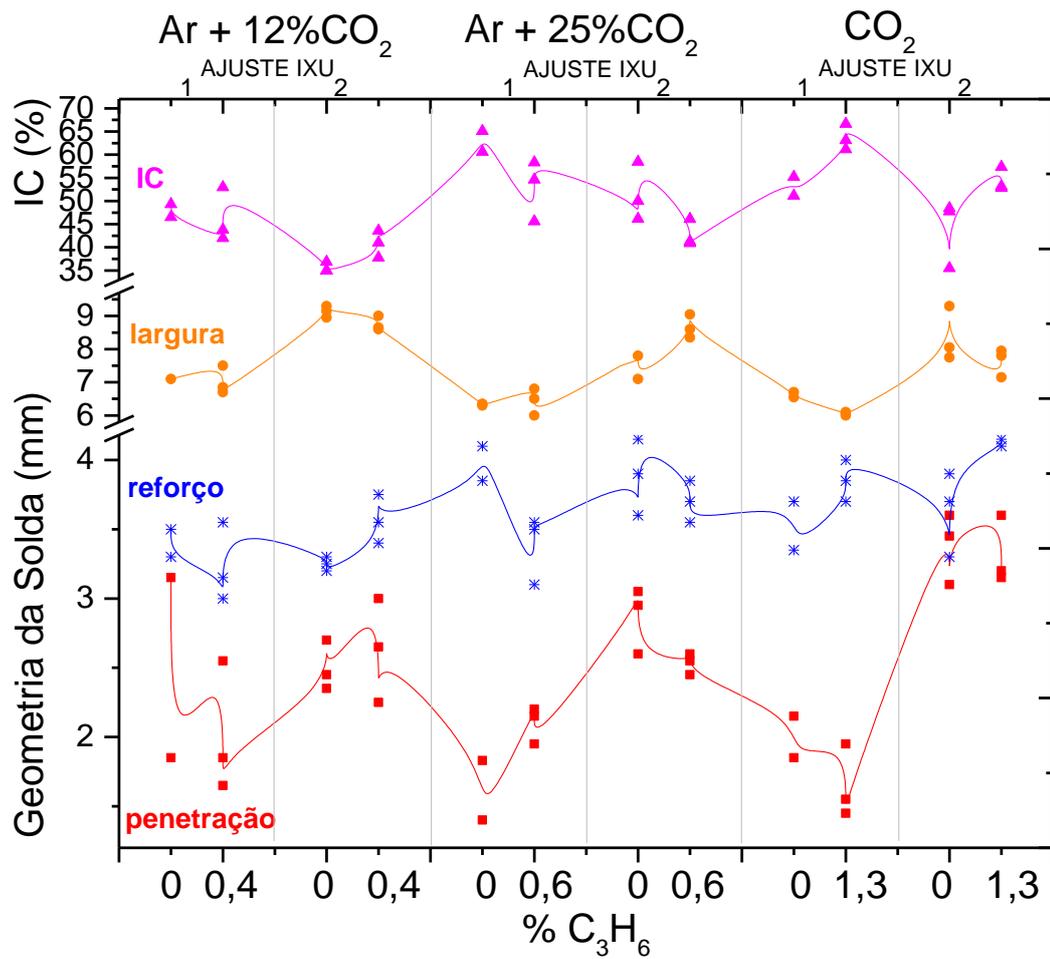


Figura 33: Índice de convexidade e geometria das soldas em função da adição de C_3H_6 nas atmosferas de proteção e dos ajustes de IxU - etapa III.

Na tabela 33 são mostrados os resultados da quantidade de metal depositado e da Td nesta etapa. O aumento de I x U no ajuste 2, elevou a temperatura do arco e conseqüentemente promoveu uma maior taxa de deposição, semelhante ao observado nos resultados das etapas I e II.

Tabela 33: Taxa de deposição das soldas - etapa III.

ATMOSFERAS DE PROTEÇÃO	Peso antes da solda (g)			Peso após limpeza da solda (g)			Metal depositado (g)			Td (kg/h)		
	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3
	Ajuste 1											
Ar+12CO ₂	488,3	483,5	-	508,7	505,0	-	20,4	21,5	-	2,12	2,24	-
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	485,1	491,6	485,3	505,5	509,8	503,9	20,4	18,2	18,6	2,12	1,86	1,94
Ar+25CO ₂	484,8	482,0	-	506,5	503,9	-	21,7	21,9	-	2,43	2,48	-
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	491,0	489,8	488,9	510,9	508,6	507,1	19,9	18,8	18,2	2,05	1,93	1,94
CO ₂	485,1	479,5	-	506,1	502,9	-	21,0	23,4	-	2,56	2,94	-
CO ₂ +1,3C ₃ H ₆	488,7	487,4	488,5	508,6	508,3	510,0	21,9	20,9	21,5	2,38	2,26	2,41
	Ajuste 2											
Ar+12CO ₂	487,8	496,6	484,7	513,0	522,1	509,8	25,2	25,5	25,1	2,57	2,61	2,57
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	489,5	487,1	493,9	514,7	511,9	519,7	25,2	24,8	25,8	2,57	2,57	2,59
Ar+25CO ₂	494,6	489,1	485,9	520,5	514,5	510,7	25,9	25,4	24,8	2,61	2,61	2,63
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	484,8	495,9	484,6	509,7	521,9	509,8	24,9	26,0	25,2	2,57	2,65	2,57
CO ₂	486,3	490,9	488,9	513,9	517,9	516,8	27,6	27,0	27,9	2,78	2,80	2,87
CO ₂ +1,3C ₃ H ₆	488,1	488,0	491,4	516,9	517,1	519,8	28,8	29,1	28,4	2,94	2,90	2,97

A figura 34 permite melhor comparar as variações da Td obtidas nas soldas no ajuste 1 e 2.

No ajuste 1, a Td de todas as soldas em atmosferas com adição de propileno foram menores se comparadas às soldas executadas nas atmosferas convencionais.

No ajuste 2, a Td das soldas em Ar+12CO₂+0,4C₃H₆ foram semelhantes das soldas em Ar+12CO₂. O mesmo ocorre com a Td das soldas em Ar+25CO₂+0,6C₃H₆ que são semelhantes das soldas em Ar+25CO₂. A Td das soldas em atmosferas CO₂+1,3C₃H₆ são maiores do que das em CO₂.

De forma geral, é observado que:

No ajuste 2 a maioria das Td das soldas apresentaram valores maiores se comparadas as Td nas mesmas atmosferas no ajuste 1.

No ajuste 2 a semelhança entre a Td das soldas em atmosferas Ar+12CO₂+0,4C₃H₆ e Ar+25CO₂+0,6C₃H₆ com Ar+12CO₂ e Ar+25CO₂, pode ser atribuído ao melhor comportamento da soldagem em atmosfera com adição de propileno em maior I x U, conforme discutido nas etapas I e II.

É observada uma tendência de que com o aumento de CO₂ nas atmosferas de proteção ocorre o aumento da maioria das Td nos dois ajustes. Esse aumento é consequência da maior capacidade térmica desse gás e também de suas reações de dissociação/recombinação no arco. Na tabela 1, pode ser visto que o calor específico molar a volume constante (Cv) do CO₂ é um pouco mais que o dobro em

comparação com a do Ar. E embora precise de uma energia maior para se dissociar no arco, na poça o processo de recombinação exotérmico ($\Delta H < 0$) devido às condições de soldagem, libera mais energia do que o Ar para a solda (Scotti e Ponomarev, 2014).

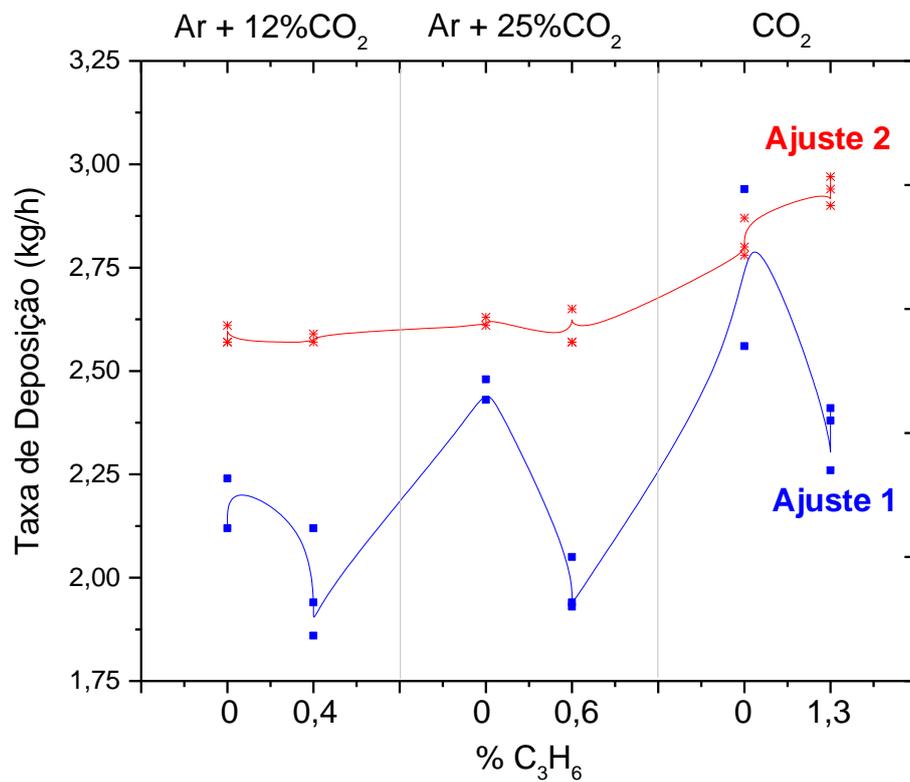


Figura 34: Taxa de deposição em função do teor de adição de propileno nas atmosferas de proteção - etapa III.

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL PROPILENO NAS
ATMOSFERAS CONVENCIONAIS DE PROTEÇÃO DO PROCESSO GMAW

RENATA BARBOSA GONÇALVES RIBEIRO

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovada em 14 de Setembro de 2016.

Comissão Examinadora:



Prof. Américo Scotti (PhD. Tecnologia da Soldagem) – UFU / UNIVERSITY WEST

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

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

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (PhD. Engenharia Mecânica) – UENF

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

4.3.2. Picos de Corrente

Nos estudos de estabilidade, verifica-se uma preferência por análises dos índices desvio padrão dos picos de corrente (DPPC), desvio padrão do período de arco aberto (DPAA) e do desvio padrão do período de curto circuito (DPCC), devido serem considerados mais sensíveis e expressarem a repetitividade do processo (Baixo e Dutra, 1995; Liskévych e Scott, 2010; Rocca *et al.*, 2005; Rezende *et al.*, 2010). Neste trabalho, considera-se também importante para o entendimento dessas variações nos desvios padrão os resultados das médias.

Neste item são estudados portanto o DPPC, as médias dos picos de corrente (MPC) e as médias da taxa de descida da corrente (diD/dt). No trabalho de Baixo e Dutra (1995) sobre a influência da taxa de variação da corrente na regularidade em soldagem MIG/MAG por curto-circuito, é concluído que as taxas de subida e descida da corrente interferem na geometria e no aspecto superficial dos cordões de solda, por interferir na regularidade da transferência. A execução das soldas em atmosferas convencionais e com adições de propileno em um mesmo ajuste de I x U, torna possível nesta etapa associar a estabilidade também com os picos de corrente. No trabalho de Souza *et al.*, (2011) é mostrado como uma das conclusões do trabalho o fato de regulagens que promovem taxas de subida e descida da corrente maiores resultam em transferências mais regulares, independente do gás de proteção utilizado. Porém nestas condições a transferência é mais abrupta, provocando mais oscilações da poça de fusão.

Baseando-se nisso é possível que mantendo a mesma regulagem da indutância diminua a influência da regulagem e mostre a influência do gás. Na tabela 34 podem ser vistos os resultados da média dos picos de corrente (MPC), do desvio padrão dos picos de corrente (DPPC) e da taxa de decrescimento da corrente (diD/dt) das soldas nas atmosferas da etapa III. Todos estes índices foram fornecidos pelo SAPV4.

Tabela 34: Média dos picos de corrente (MPC), desvio padrão dos picos de corrente (DPPC) e taxa de decrescimento da corrente (di/dt) das soldas nas atmosferas - etapa III.

Atmosferas de Proteção	MPC (A)			DPPC (A)			$\frac{di}{dt} D \left(\frac{A}{ms} \right)$		
	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3
	Ajuste 1								
Ar+12CO ₂	298,3	303,4	-	112,5	119,0	-	22,5	21,6	-
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	301,9	295,2	306,9	114,3	103,6	120,7	23,5	24,2	22,7
Ar+25CO ₂	353,8	353,8	-	132,9	137,4	-	32,9	32,1	-
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	336,7	366,5	381,6	120,4	115,8	119,4	27,9	31,6	32,8
CO ₂	407,4	413,5	-	130,3	123,3	-	42,1	40,7	-
CO ₂ + 1,3C ₃ H ₆	394,1	411,7	422,0	109,7	117,6	112,7	43,3	42,6	45,8
	Ajuste 2								
Ar+12CO ₂	312,7	307,3	309,9	99,4	94,1	98,7	25,7	25,0	24,4
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	324,6	359,1	347,8	106,7	127,1	122,0	28,6	27,8	25,7
Ar+25CO ₂	457,0	429,9	451,8	112,8	119,6	99,5	42,8	40,7	44,5
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	368,4	359,1	358,2	121,0	114,0	119,0	33,6	34,0	32,9
CO ₂	417,2	453,9	579,0	129,1	113,8	98,6	38,6	46,4	48,1
98,7%CO ₂ + 1,3%C ₃ H ₆	508,1	505,5	510,1	93,5	98,2	98,1	48,6	47,7	47,9

Devido a diD/dt controlar a rapidez com que o arco se restabelece após cada pico de corrente (curto circuito), quanto maior este índice melhor deve ser a estabilidade do arco. Em casos onde a MPC é menor a tendência também é de diminuição da diD/dt sem alteração da estabilidade. O DPPC menor vai indicar a maior repetitividade desse comportamento ao longo da transferência. Por isso a necessidade de, para comparação quanto à estabilidade do arco, observar esses índices de forma correlacionada.

Na figura 35 estão plotados os valores da diD/dt , MPC e DPPC em função da atmosfera de proteção utilizada nos dois ajustes de $I \times U$. Pode ser observado que no ajuste 1:

- As soldas em $Ar+12CO_2+0,4C_3H_6$ apresentam valores próximos da MPC, maior diD/dt e DPPC menor que os encontrados nas soldas em $Ar+12CO_2$.
- As soldas em $Ar+25CO_2+0,6C_3H_6$ tem valores próximos da MPC e da diD/dt , menor DPPC que os encontrados nas soldas em $Ar+25CO_2$.
- As soldas em $CO_2+1,3C_3H_6$ apresentam valores próximos da MPC, maior diD/dt , menor DPPC que os encontrados nas soldas em CO_2 .

No ajuste 2:

- As soldas em $Ar+12CO_2+0,4C_3H_6$ apresentam valores maiores da MPC, da diD/dt , do DPPC que os encontrados nas soldas em $Ar+12CO_2$. O aumento dos picos de corrente dessas soldas foi acompanhado do aumento da diD/dt que proporcionou estabilidade na operação, apesar de apresentar um maior valor do DPPC.
- As soldas em $Ar+25CO_2+0,6C_3H_6$ apresentam menor MPC, menor diD/dt e menor DPPC que os encontrados nas soldas em $Ar+25CO_2$. Os menores valores da MPC indicam que a tensão ajustada para a corrente regulada não foi adequada, pois embora as soldas apresentem menores DPPC, a diD/dt baixa faz com que se tenha um tempo maior de extinção do arco.
- As soldas em $CO_2+1,3C_3H_6$ apresentam valores próximos da MPC, maior diD/dt , menor DPPC que os encontrados nas soldas em CO_2 .

Excluindo-se a soldagem em atmosfera $Ar+25CO_2+0,6C_3H_6$ no ajuste 2, a melhor estabilidade, por estes índices relacionados aos picos de corrente, são das soldas com adição de propileno.

Os maiores valores da diD/dt mostram que a adição de propileno contribuiu para facilitar as reignições do arco após os curtos circuitos. Dutra, (2009) mostra a maior influência da taxa de descida da corrente na fase de restabelecimento do arco.

Os menores DPPC das soldas nas atmosferas com adição de propileno, proporcionam maior repetitividade ao longo do tempo de soldagem, indicado pela pouca dispersão dos resultados.

Ressalta-se também por estes critérios que a adição de propileno na atmosfera de proteção CO_2 foi mais efetiva na melhoria da estabilidade do arco, diminuindo a instabilidade na soldagem nesta atmosfera nos dois ajustes.

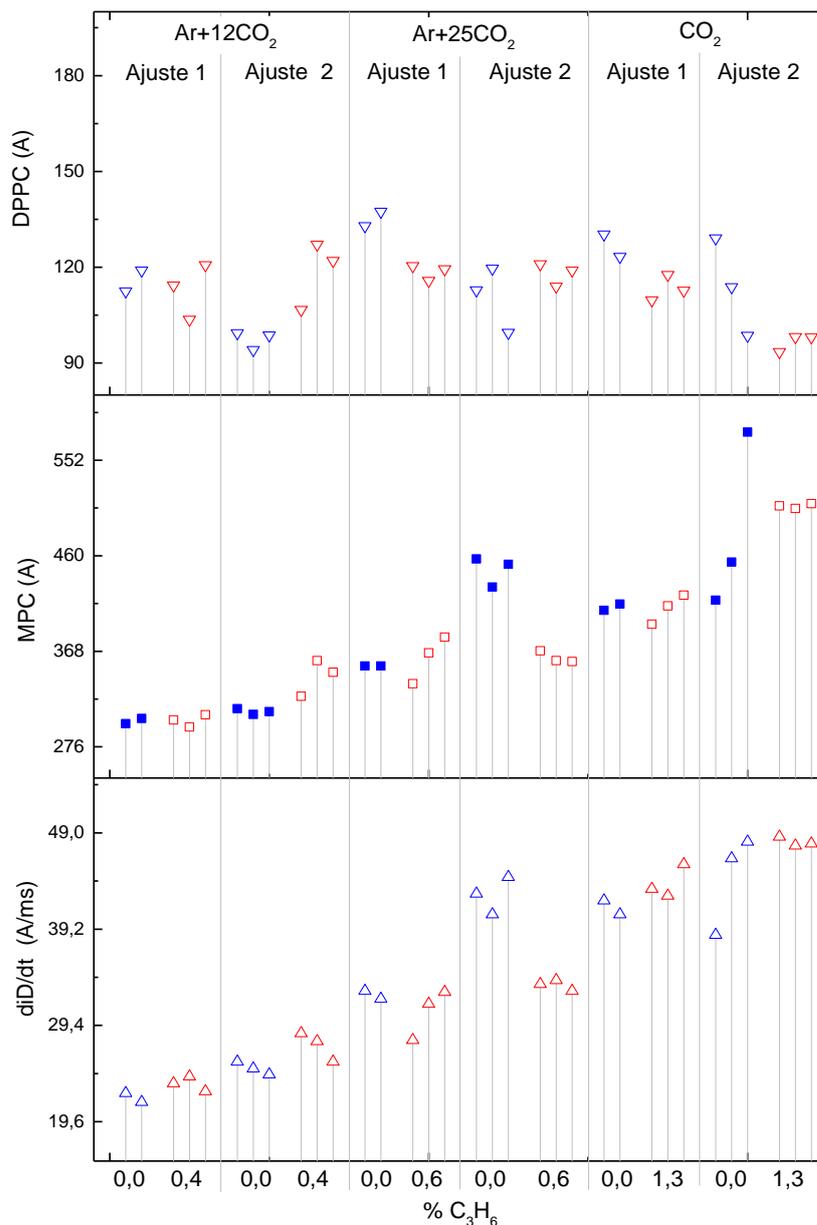


Figura 35: Variação da taxa de decrescimento da corrente (di/dt D), média dos picos de corrente (MPC) e desvio padrão dos picos de corrente (DPPC) para as atmosferas convencionais e com adição de propileno - etapa III.

4.3.3 Histogramas dos Picos de Corrente

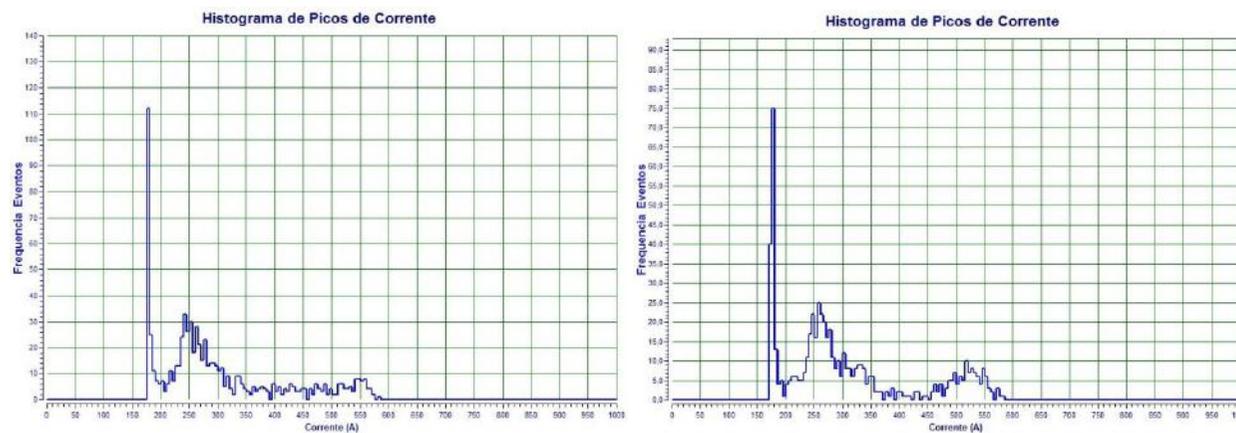
Nas figuras 36, 37, 38, 39, 40 e 41 são mostrados os histogramas dos picos de corrente de cada solda executada, agrupados por atmosfera de proteção e ajuste da I x U. A comparação desses histogramas permite observar que:

As soldas em $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas as em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$:

- Na figura 36, referente ao ajuste 1, apresentam maior frequência de picos de corrente, indicando a melhoria da estabilidade do arco.
- Na figura 37, referente ao ajuste 2, apresentam menor frequência de picos de corrente e também em valores acima de 250 A, indicando diminuição da estabilidade do arco.

A menor frequência da corrente mais elevada é considerada como condição favorável à geração respingos, conforme mostrado no trabalho de Baixo e Dutra (1989) sobre transferência metálica. Estes autores usando os histogramas do período de transferência, na análise dos tratamentos oscilográficos de corrente e tensão, mostram que quanto maiores os períodos de transferências, que apresentavam variações da corrente em níveis mais elevados, favoreciam a geração de respingos. No entanto, devido as soldas nas atmosferas com adição de propileno conferirem ao arco maior entalpia, essas diferenças na frequência dos picos de corrente em maiores valores aparentemente tem pouca contribuição na geração de instabilidade.

Ar + 12%CO₂ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V



Ar + 12%CO₂ + 0,4%C₃H₆ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V

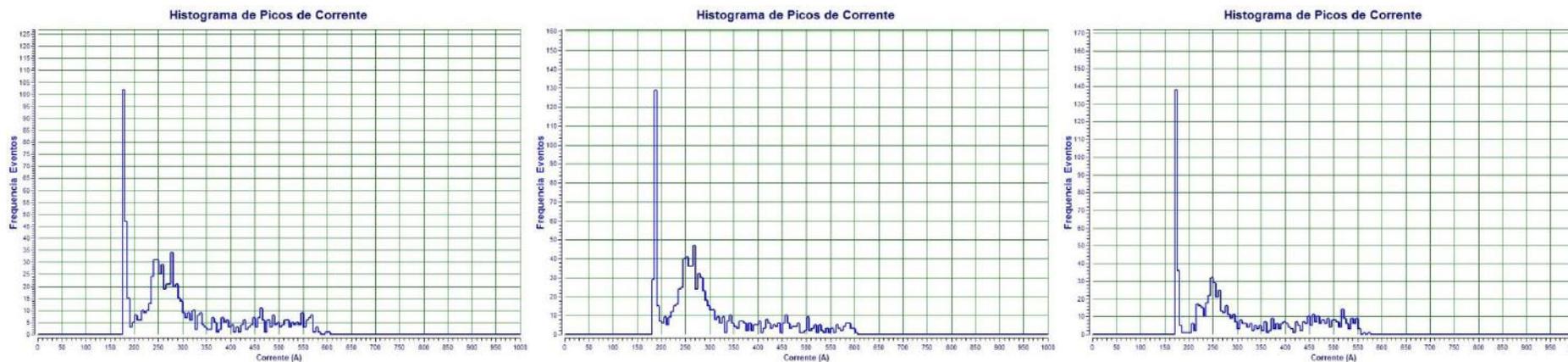
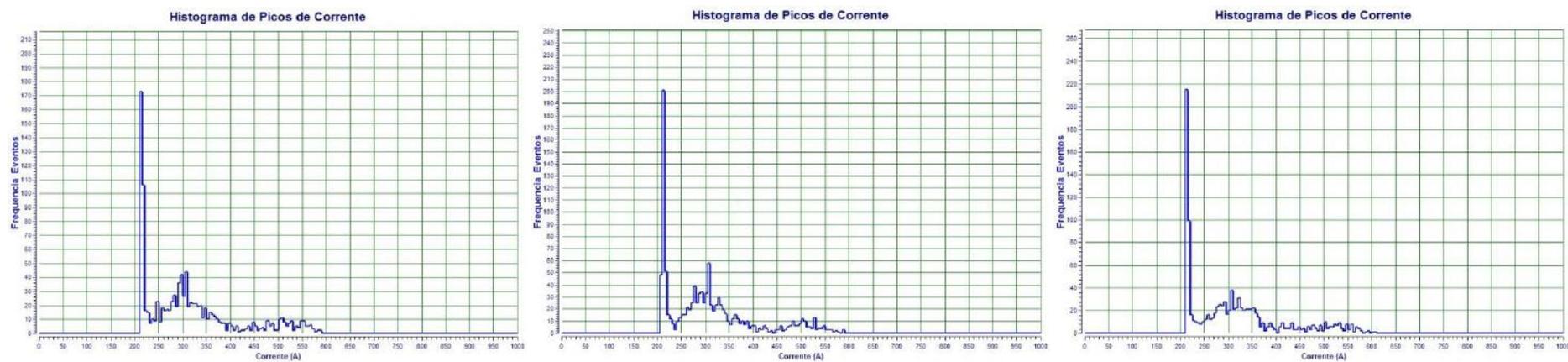


Figura 36: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de Ar+12CO₂ e Ar+12CO₂+0,4C₃H₆ no ajuste 1 - etapa III.

Ar + 12%CO₂ Ajuste: 206,6 ± 1,1 A / 21,05 ± 0,05 V



Ar + 12%CO₂ + 0,4%C₃H₆ Ajuste: 206,6 ± 1,1 A / 21,05 ± 0,05 V

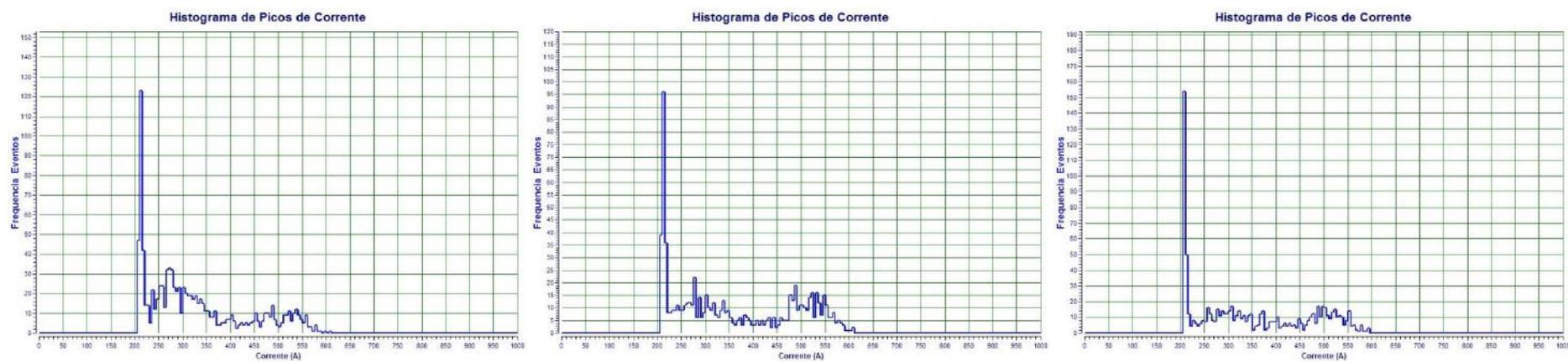


Figura 37: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de Ar+12CO₂ e Ar+12CO₂+0,4C₃H₆ no ajuste 2 - etapa III.

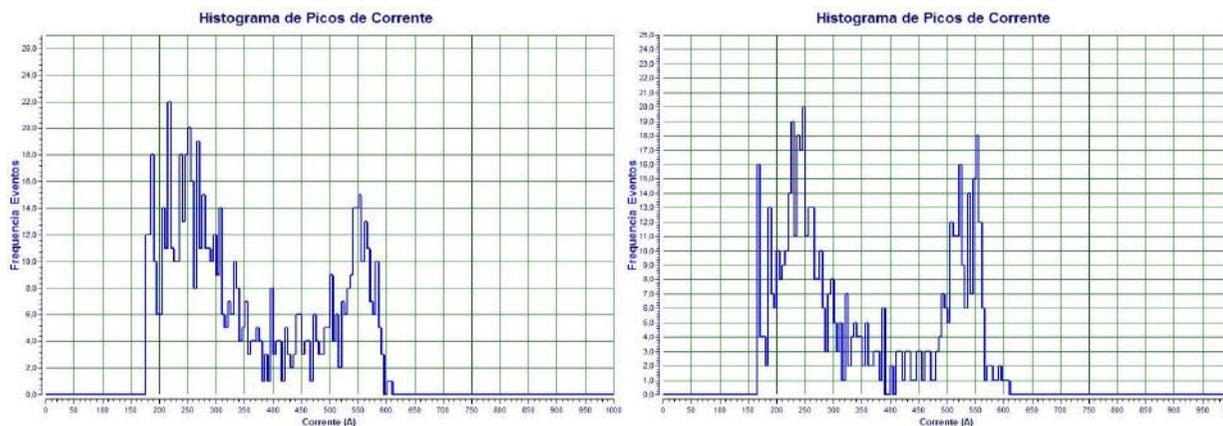
As soldas em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas as em $\text{Ar}+25\text{CO}_2$:

- Na figura 38 e 39 , referente respectivamente ao ajuste 1 e 2, apresentam maior frequência de picos de corrente, indicando a melhoria da estabilidade do arco.

Na atmosfera $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$, no ajuste 2, pode ser considerado que os histogramas destas soldas, figura 39, indicam que a regulagem da tensão não foi suficiente para que os picos de corrente alcançassem os valores melhores para as transferências do que os das soldas em $\text{Ar}+25\text{CO}_2$. Souza *et al.*, (2011) mostram que nem sempre transferências com maiores correntes de pico implicam em irregularidades.

Nos histogramas das figuras 38, 39, 40, 41 constam como se fossem duas regiões de frequência de picos de corrente, uma próxima ao valor ajustado e outras frequências com maiores valores de corrente. No trabalho de Scotti e Ponomarev (2014) são feitas considerações a respeito dos histogramas, mostrando que estas regiões são características do tipo de curto circuito que ocorre na transferência metálica. Neste trabalho, no entanto, procura-se observar de forma geral a frequência dos picos de corrente relacionado-os com a estabilidade, independente do tipo de curto circuito.

Ar + 25%CO₂ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V



Ar + 25%CO₂ + 0,6%C₃H₆ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V



Figura 38: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de Ar+25CO₂ e Ar+25CO₂+0,6C₃H₆ no ajuste 1 - etapa III.

Ar + 25%CO₂ Ajuste: 209,0 ± 3,0 A / 20,90 ± 0,10 V



Ar + 25%CO₂ + 0,6%C₃H₆ Ajuste: 209,0 ± 3,0 A / 20,90 ± 0,10 V



Figura 39: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de Ar+25CO₂ e Ar+25CO₂+0,6C₃H₆ - etapa III.

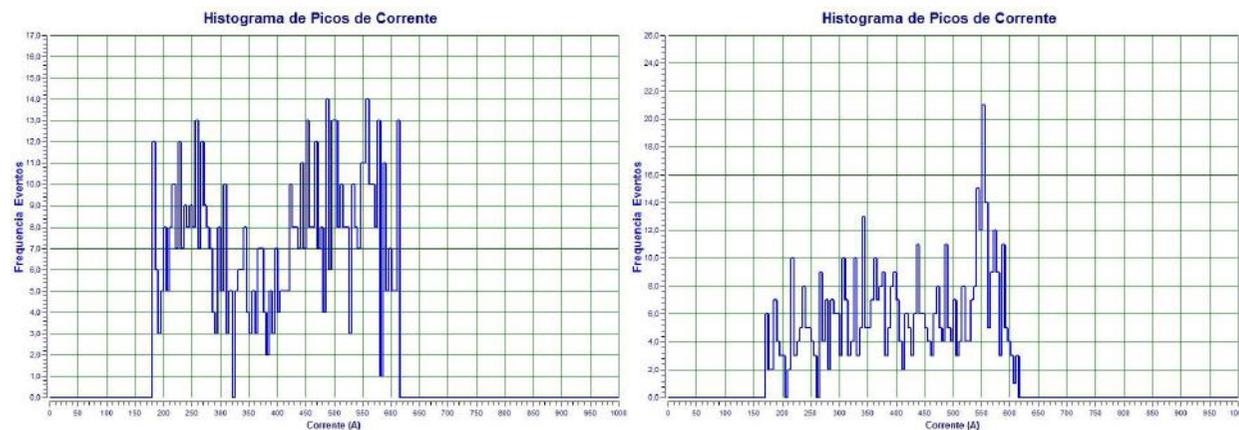
As soldas em $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas as em CO_2 :

- Na figura 40 e 41, no ajuste 1 e 2 respectivamente, apresentam maior frequência de picos de corrente menores, indicando a melhoria da estabilidade do arco.

Analisando-se todos os histogramas das soldas na etapa III, de forma comparativa, pode-se atribuir ao aumento de CO_2 nas atmosferas de proteção instabilidades no arco, identificada através da redução da frequência dos picos de corrente próximos aos valores ajustados e aumento da variação da frequência dos picos em maiores valores de corrente.

Em todas as atmosferas de proteção com adição do gás combustível propileno resultou em maior frequência dos valores da corrente, de certa forma regulando os maiores valores de pico, podendo ser consideradas também por este critério, como favorecedoras da estabilidade do arco.

100%CO₂ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V



98,7%CO₂ + 1,3%C₃H₆ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V

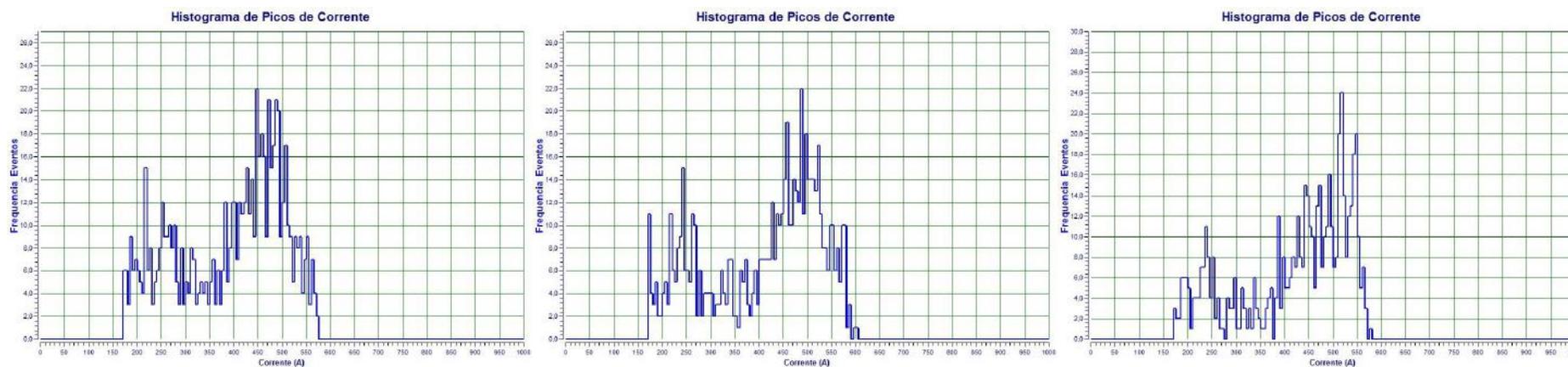
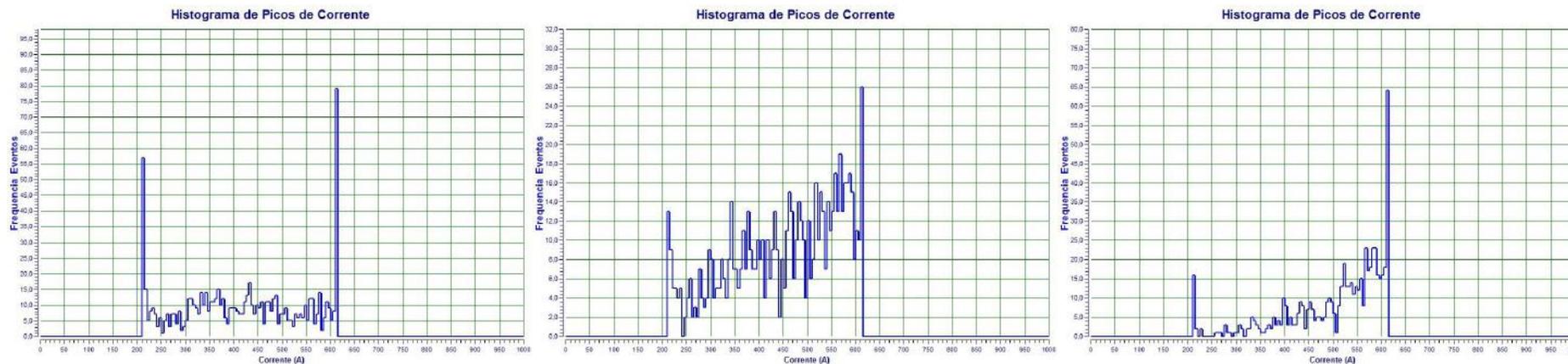


Figura 40: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de CO₂ e CO₂+1,3C₃H₆ no ajuste 1 - etapa III.

100%CO₂ Ajuste: 208,0 ± 3,6 A / 23,00 ± 0,30 V



98,7%CO₂ + 1,3%C₃H₆ Ajuste: 208,0 ± 3,6 A / 23,0 ± 0,30 V

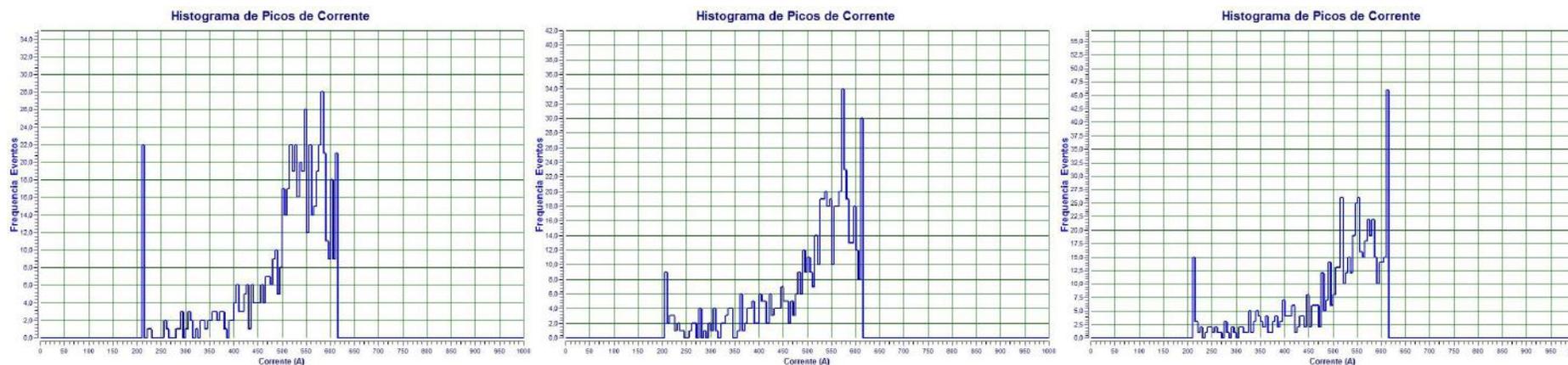


Figura 41: Histogramas de Picos de Corrente das soldas em atmosferas de CO₂ e CO₂+1,3C₃H₆ no ajuste 1 - etapa III.

4.3.4 Tempos de Arco Aberto, Tempos de Curto-Circuito e Períodos de Transferências

A repetição ao longo do tempo do contato entre o eletrodo e a poça de fusão, característico da transferência por curto circuito, deve ser o mais regular possível. Kang *et al.*, (2003) mostram que na soldagem há maior probabilidade de ocorrerem respingos quando o tempo de arco e/ou o tempo de curto circuito é irregular.

A média dos tempos de arco aberto (t_{ab}), desvio padrão dos tempos de arco aberto (DPAA), média dos tempos de curto-circuito (t_{cc}), desvio padrão dos tempos de curto circuito (DPCC) e média dos períodos de transferências (P) tem sido frequentemente utilizados como indicadores da regularidade da transferência e, conseqüentemente, da estabilidade do processo de soldagem (Hermans e Ouden, 1997; Roca *et al.*, 2005).

Os picos de corrente determinam quando o eletrodo inicia seu período de arco, que deve ser suficiente para que a gota tenha o tempo adequado de crescimento. Picos de corrente inadequados podem ser identificados nos tempos de curto-circuito, que tendem a apresentar maior DPCC.

A consequência dos picos de corrente menor que o necessário, é que se obtém tempos de curto-circuito menores, com transferência irregular e geração de respingos. Enquanto que se os picos de corrente forem excessivos, a gota na transferência pode ter mais tempo de crescimento que o necessário, identificada com o tempo de curto-circuito elevado, que também provoca instabilidade (Dutra e Baixo, 1990; Roca *et al.*, 2005; Scotti e Ponomarev, 2014).

Na tabela 35 são mostrados os resultados das t_{ab} , t_{cc} , P e dos DPAA, DPCC das soldas realizadas nesta etapa.

Tabela 35: Resultados das médias dos tempos de arco aberto (t_{ab}), desvio padrão dos tempos de arco aberto (DPAA), médias dos tempos de curto circuito (t_{cc}), desvio padrão dos tempos de curto circuito (DPCC), médias dos períodos de transferências - etapa III.

Atmosferas de Proteção	t_{ab} (ms)			DPAA (ms)			t_{cc} (ms)			DPCC (ms)			P (ms)		
	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3	CT1	CT2	CT3
Ajuste 1															
Ar+12CO ₂	18,5	17,8	-	16,6	23,6	-	4,6	4,5	-	5,1	4,9	-	23,0	22,2	-
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	16,9	17,5	21,8	16,8	11,0	14,9	4,2	4,1	5,3	4,3	3,6	4,2	21,1	21,6	27,0
Ar+25CO ₂	11,7	10,4	-	15,8	17,1	-	4,7	4,2	-	6,2	6,3	-	16,4	14,6	-
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	17,7	19,3	20,7	15,7	14,4	14,1	5,1	6,4	7,1	4,3	4,5	5,0	22,8	25,6	27,7
CO ₂	10,7	7,1	-	12,8	9,9	-	5,1	4,0	-	6,1	7,0	-	15,7	11,1	-
CO ₂ + 1,3C ₃ H ₆	13,4	16,0	9,9	11,2	14,6	11,7	6,6	6,8	5,7	5,8	5,7	7,5	19,9	22,8	16,7
Ajuste 2															
Ar+12CO ₂	15,0	14,2	15,9	10,3	9,5	10,8	2,9	2,7	2,9	2,6	2,3	2,6	17,9	16,9	18,8
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	14,9	19,3	17,7	10,5	13,6	14,1	3,1	4,1	3,8	2,7	3,4	3,2	18,1	23,5	21,5
Ar+25CO ₂	21,1	20,2	21,5	12,5	13,0	10,2	7,2	6,6	7,8	4,2	3,8	3,8	28,3	26,8	29,3
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	16,8	13,5	13,2	11,1	10,1	11,1	4,7	3,9	3,6	3,8	3,3	3,6	21,4	17,3	16,8
CO ₂	17,1	17,8	23,7	14,0	10,7	11,4	4,5	5,6	7,2	3,6	3,6	3,6	21,6	23,4	30,8
CO ₂ + 1,3C ₃ H ₆	24,0	23,7	23,6	11,4	12,5	11,6	7,7	7,6	7,2	3,4	3,8	3,3	31,7	31,3	30,7

Na figura 42 são mostrados os índices t_{ab} , DPAA, t_{cc} , DPCC e o P, em função do teor de C_3H_6 nas atmosferas de proteção. Pode ser visto que:

As soldas com $Ar+12CO_2+0,4C_3H_6$ se comparadas com as de $Ar+12CO_2$:

- No ajuste 1, tem semelhante t_{ab} , t_{cc} , P e menor DPAA e DPCC, indicando menor dispersão na transferência.
- No ajuste 2, tem maior t_{ab} , t_{cc} , P, DPAA, DPCC. Os maiores valores da t_{ab} e P podem indicar melhoria da estabilidade, enquanto maior t_{cc} , DPAA e DPCC tende a estar relacionado com irregularidades na transferência.

A adição de propileno aumentou a t_{ab} no ajuste 2, como consequência da maior MPC, que foi acompanhada de maior diD/dt . O aumento da t_{cc} foi influenciado pelas maiores médias dos picos de corrente. Por isso pode-se considerar por este critério que a soldagem em $Ar+12CO_2+0,4C_3H_6$ tem transferência semelhante a da soldagem em $Ar+12CO_2$. O aumento do DPAA e DPCC foi consequência da diminuição da frequência de picos de corrente, visto nos histogramas da figura 37 no item 4.3.2.2.

As soldas com $Ar+25CO_2+0,6C_3H_6$ se comparadas com as de $Ar+25CO_2$:

- No ajuste 1, tem semelhante t_{ab} , t_{cc} e P e menor DPAA e DPCC, podendo indicar uma possível melhor estabilidade da transferência.
- No ajuste 2, tem menor t_{ab} , t_{cc} , P e menor DPAA e DPCC. No estudo da estabilidade da transferência, em geral, menor valor da t_{cc} , do DPAA e do DPCC está associado com melhor estabilidade, principalmente quando acompanhados de menor valor da t_{ab} .

Na soldagem em $Ar+25CO_2+0,6C_3H_6$, no ajuste 2, a menor t_{ab} , t_{cc} e P, foi consequência da menor MPC, figura 35 do item 4.3.2.2. Portanto, como a diminuição da P foi devido a menor t_{ab} e t_{cc} a estabilidade pode ser analisada pelo menor DPAA e DPCC, que indica melhoria da estabilidade, devido a constância dos tempos de arco aberto e de curto-circuito.

Os autores Souza *et al.*, (2011) se reportam ao trabalho de Baixo e Dutra (1991) onde é explicado que em arcos muito curtos, o tempo de arco, onde ocorre a fusão do eletrodo torna-se muito pequeno. Ao ocorrer o contato com a poça de fusão a extremidade fundida do eletrodo ainda pode estar num estágio de fusão impróprio para transferência. Quanto mais prematuro o contato, maior o tempo para que o calor gerado por efeito joule na ponta de ligação gere a sua fusão, promovendo um maior valor de pico de corrente de curto, gerando perturbação excessiva do metal

fundido na poça metálica. Essa condição não foi evidenciada na soldagem em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$, corroborando a hipótese que neste caso deve ser considerado principalmente para análise o resultado do desvio padrão.

A necessidade de uma regulação de maior valor de tensão para manter a corrente de soldagem foi identificada devido ao maior teor de CO_2 no arco associado ao maior teor de adição de C_3H_6 . Pode ser visto que em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$, no ajuste 2, o menor valor da MPC promoveu a menor t_{ab} , que é o critério efetivamente relacionado as transferências.

As soldas com $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas com as de CO_2 :

- No ajuste 1, tem maior t_{ab} , t_{cc} , P e semelhantes DPAA e DPCC, indicando a constância durante a transferência.
- No ajuste 2, tem maior t_{ab} , t_{cc} , P e ligeiramente menor DPAA e DPCC, podendo indica a maior constância durante a transferência.

Em atmosferas $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$, como consequência da maior t_{ab} , t_{cc} , P, é esperado um maior tamanho das gotas com uma transferência mais adequada, resultando numa melhor estabilidade.

A hipótese da adição de propileno promover o aumento do tempo de crescimento das gotas, considerado mais adequado, se baseia no explicado por Junior *et al.*, (2015) no estudo comparativo da taxa e eficiência de deposição dos consumíveis ER70S-6 e E71T-1C. Os autores mostram ser a redução da corrente de soldagem responsável pelo aumento do tamanho da gota. Este efeito pode estar relacionado à componente da força eletromagnética, que favorece o destacamento e a redução da densidade de corrente na ponta do consumível, junto ao arco elétrico e com a redução no aquecimento da ponta do arame maciço promove sua fusão. Essa é tanto mais intensa quanto maior for a corrente de soldagem, favorecendo a transferência da gota em tempos menores, isto é, produzindo gotas com tamanhos menores.

O aumento do tempo tanto de arco aberto quanto de curto-circuito nas soldas estudadas com adição de propileno ocorre devido as reações no arco, produzindo gotas maiores provavelmente devido a geração de menor quantidade de calor por efeito Joule disponibilizado ao sistema. O DPAA e DPCC ligeiramente menor destas soldas, indica também uma possível influência do propileno na diminuição da instabilidade da transferência, contribuindo para a hipótese que esse tamanho das

gotas, maiores, deva ser mais adequado se comparado ao tamanho das gotas nas atmosferas convencionais.

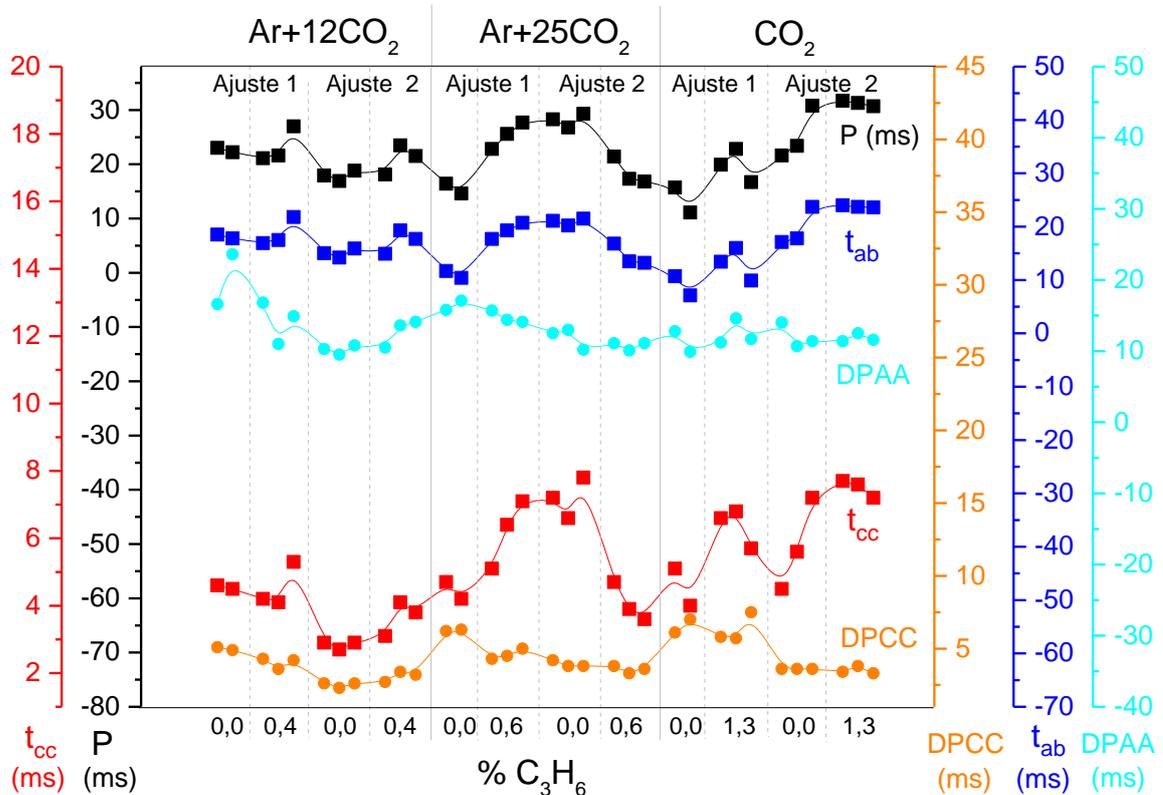


Figura 42: Variação das médias do tempo de arco aberto (t_{ab}), desvio padrão dos tempos de arco aberto (DPAA), médias dos tempos de curtos circuitos (t_{cc}), desvio padrão dos tempos de curtos circuitos (DPCC) e médias dos períodos de transferências (P) - etapa III.

4.3.5 Ciclogramas

Os ciclogramas de cada solda nos ajustes utilizados de I x U são mostrados nas figuras 43, 44, 45, 46, 47, 48. Nestes é visto a variação do tempo de arco aberto e do tempo de curto-circuito em função da corrente e tensão da soldagem. Este critério reforça a identificação da influência na estabilidade tanto do ajuste de I x U como das atmosferas de proteção utilizadas na soldagem (Roca *et al.*, 2005). Os tempos de arco aberto, localizados na parte superior dos ciclogramas, são associados a elevada tensão enquanto que os tempos de curtos circuitos são

associados a baixos valores de tensão, típico da transferência por curto-circuito (Suban e Tušek, 2003).

As soldas com $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas com as de $\text{Ar}+12\text{CO}_2$:

- No ajuste 1, figura 43, tem menor variação da $I \times U$ nas curvas que representam os tempos de arco aberto e de curtos-circuitos nos ciclogramas, indicando melhor estabilidade do arco.
- No ajuste 2, figura 44, não apresentam variações significativas da $I \times U$ nas curvas que representam os tempos de arco aberto e de curto-circuito nos ciclogramas, indicando estabilidade do arco semelhante durante as transferências.

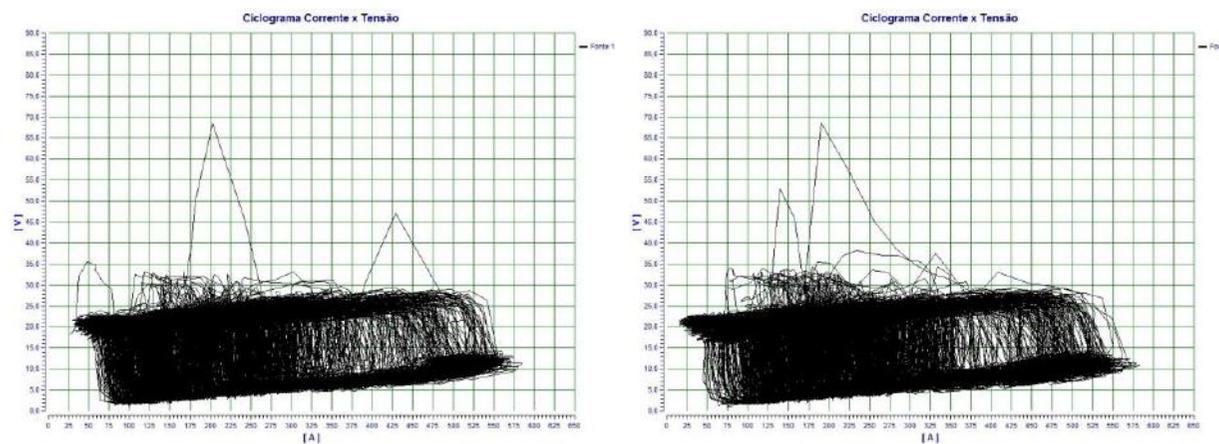
As soldas com $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas com as de $\text{Ar}+25\text{CO}_2$:

- No ajuste 1, figura 45, tem menor variação da $I \times U$ nas curvas que representam os tempos de arco aberto e de curto-circuito, indicando melhor estabilidade do arco durante a transferência.
- No ajuste 2, figura 46, não apresentam variações significativas da $I \times U$ nas curvas que representam os tempos de arco aberto e de curto-circuito nos ciclogramas, indicando estabilidade do arco semelhante.

As soldas com $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas com as de CO_2 :

- Nos ajustes 1 e 2, figura 47 e 48, tem menor variação da $I \times U$ nas curvas que representam os tempos de arco aberto e de curto-circuito, indicando melhor estabilidade do arco durante a transferência.

Ar + 12%CO₂ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V



Ar + 12%CO₂ + 0,4%C₃H₆ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V

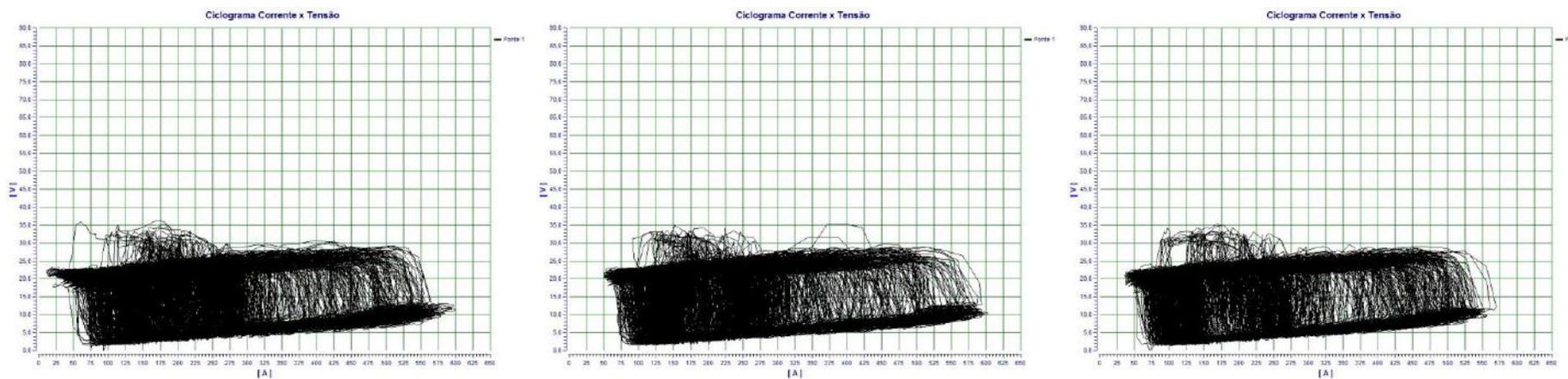
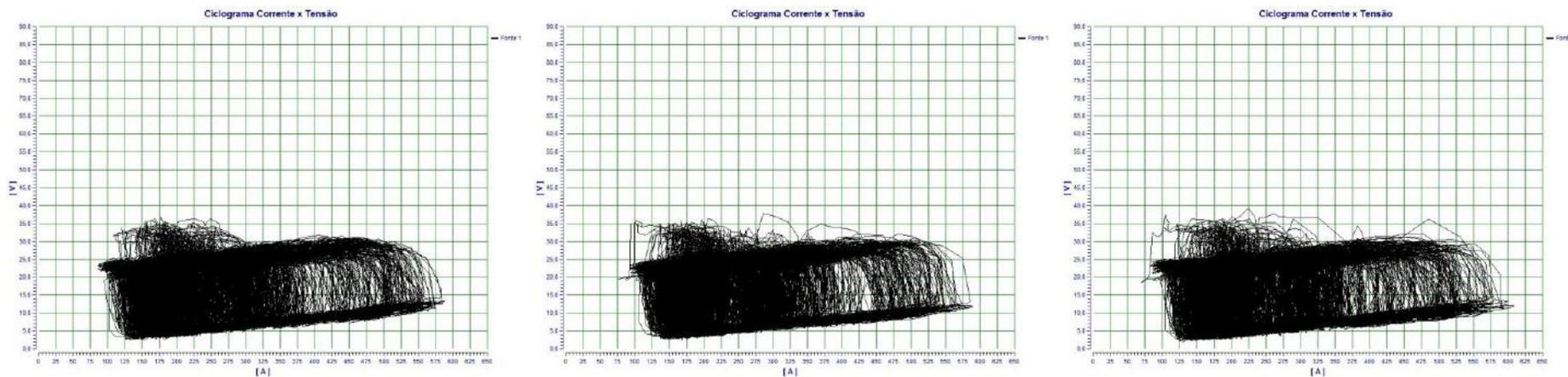


Figura 43: Ciclogramas das soldas em atmosferas Ar+12CO₂ e Ar+12CO₂+0,4C₃H₆ no ajuste 1 - etapa III.

Ar + 12%CO₂ Ajuste: 206,6 ± 1,1 A / 21,05 ± 0,05 V



Ar + 12%CO₂ + 0,4%C₃H₆ Ajuste: 206,6 ± 1,1 A / 21,05 ± 0,05 V

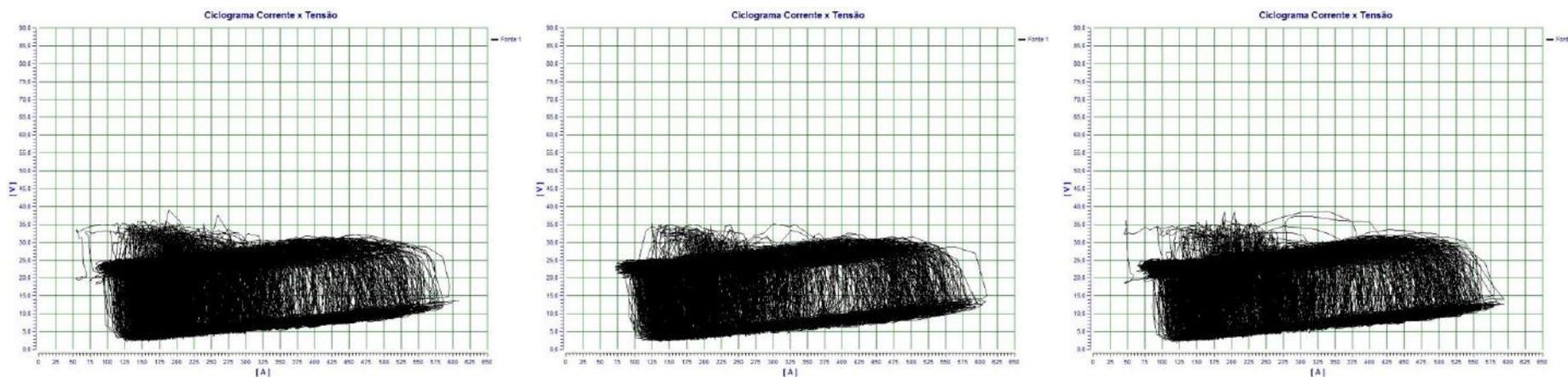
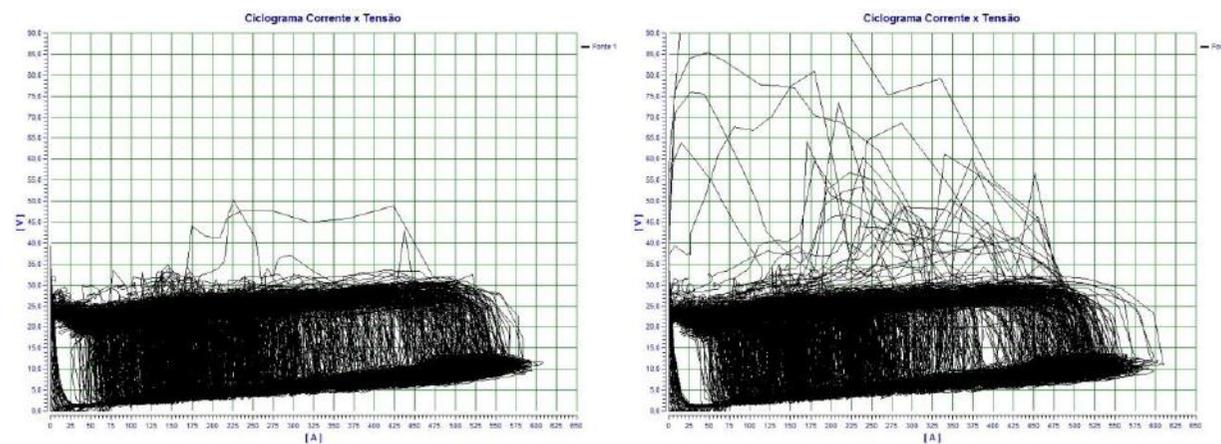


Figura 44: Ciclogramas das soldas em atmosferas Ar+12CO₂ e Ar+12CO₂+0,4C₃H₆ no ajuste 2 - etapa III.

Ar + 25%CO₂ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V



Ar + 25%CO₂ + 0,6%C₃H₆ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V

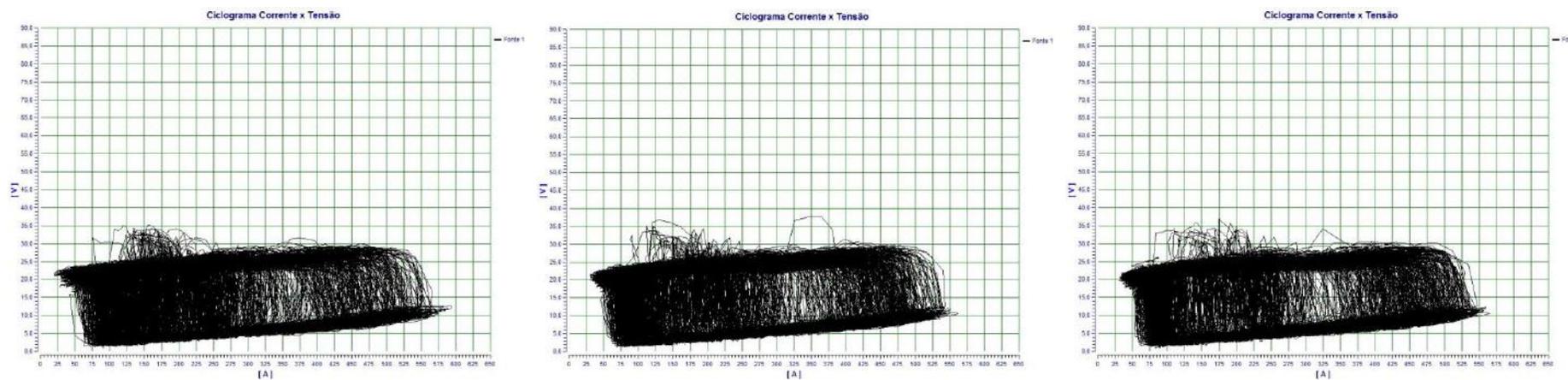
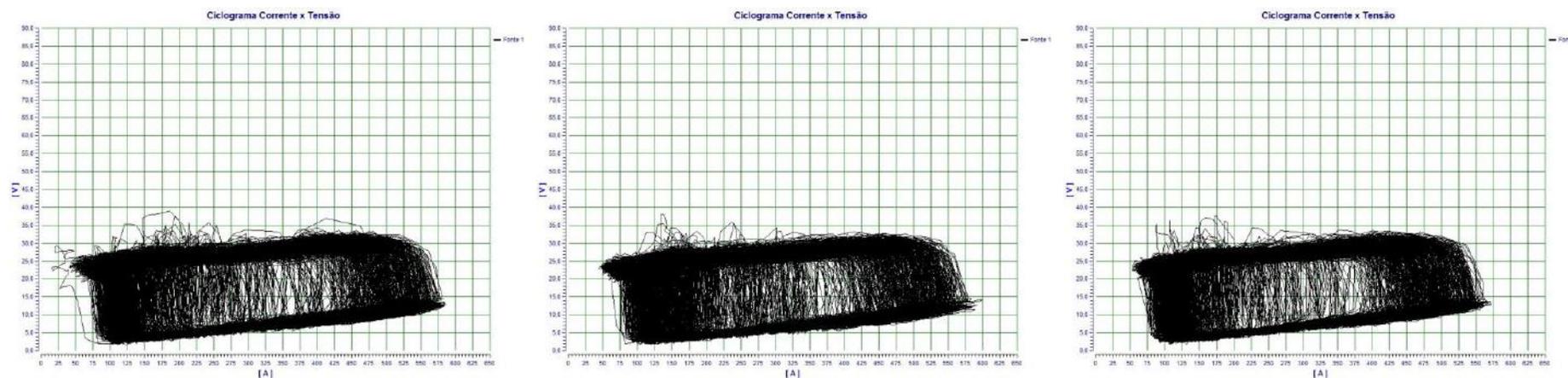


Figura 45: Ciclogramas das soldas em atmosferas Ar+25CO₂ e Ar+25CO₂+0,6C₃H₆ no ajuste 1 - etapa III.

Ar + 25%CO₂ Ajuste: 209,0 ± 3,0 A / 20,90 ± 0,10 V



Ar + 25%CO₂ + 0,6%C₃H₆ Ajuste: 209,0 ± 3,0 A / 20,90 ± 0,10 V

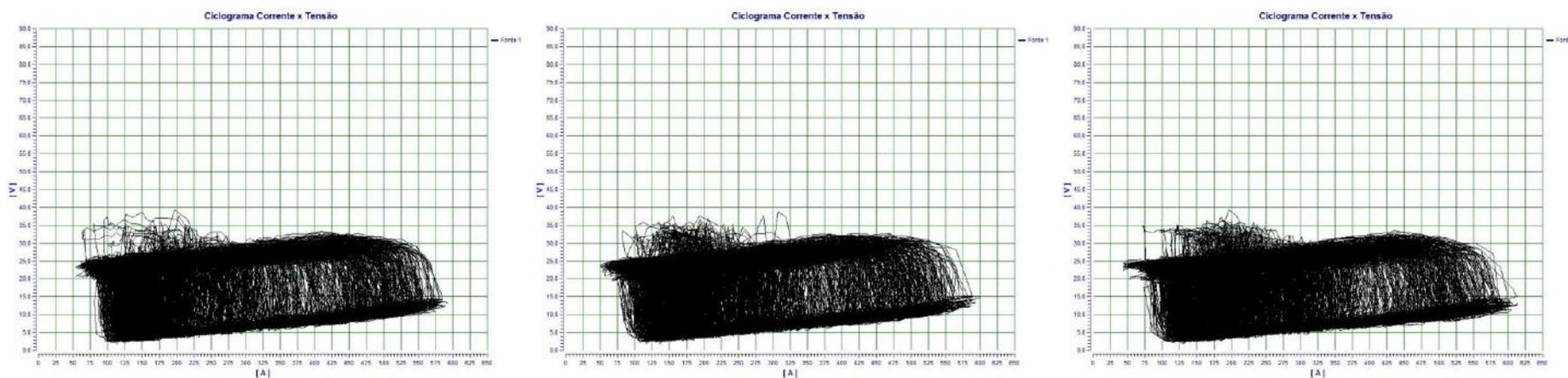
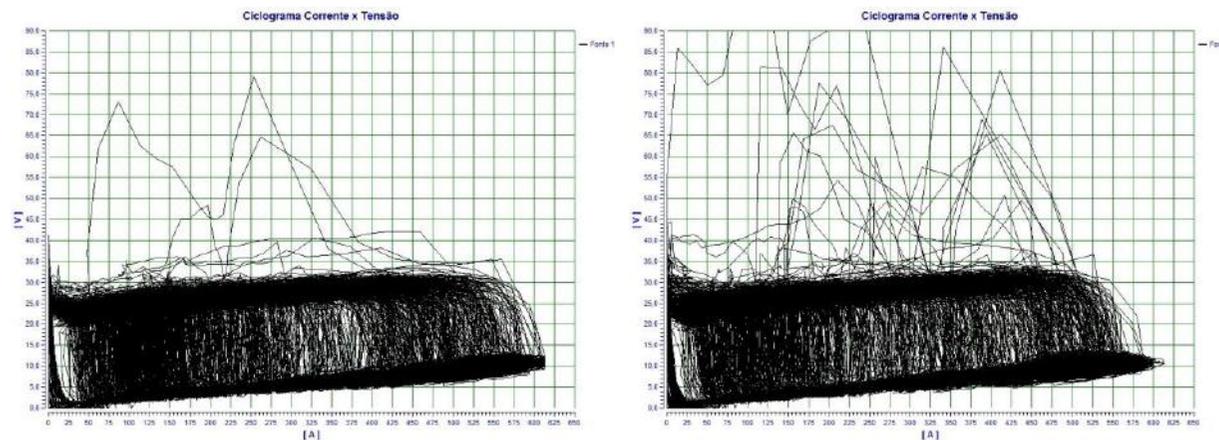


Figura 46: Ciclogramas das soldas em atmosferas Ar+25CO₂ e Ar+25CO₂+0,6C₃H₆ no ajuste 2 - etapa III.

100%CO₂ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V



98,7%CO₂ + 1,3%C₃H₆ Ajuste: 175,0 ± 8,1 A / 18,90 ± 0,20 V

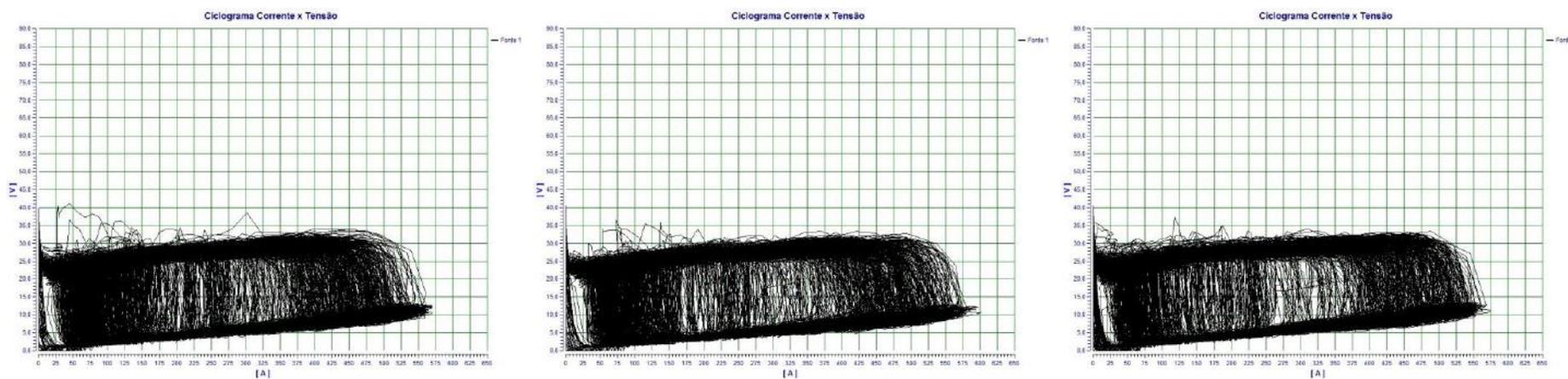
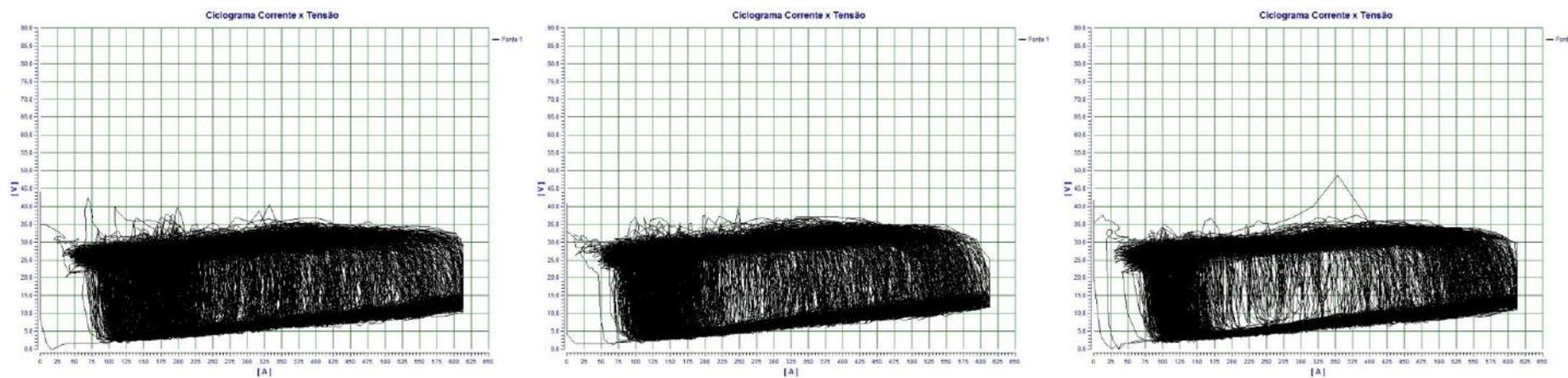


Figura 47: Ciclogramas das soldas em atmosferas CO₂ e CO₂+1,3C₃H₆ no ajuste 1 - etapa III.

100%CO₂ Ajuste: 208,0 ± 3,6 A / 23,00 ± 0,30 V



98,7%CO₂ + 1,3%C₃H₆ Ajuste: 208,0 ± 3,6 A / 23,0 ± 0,30 V

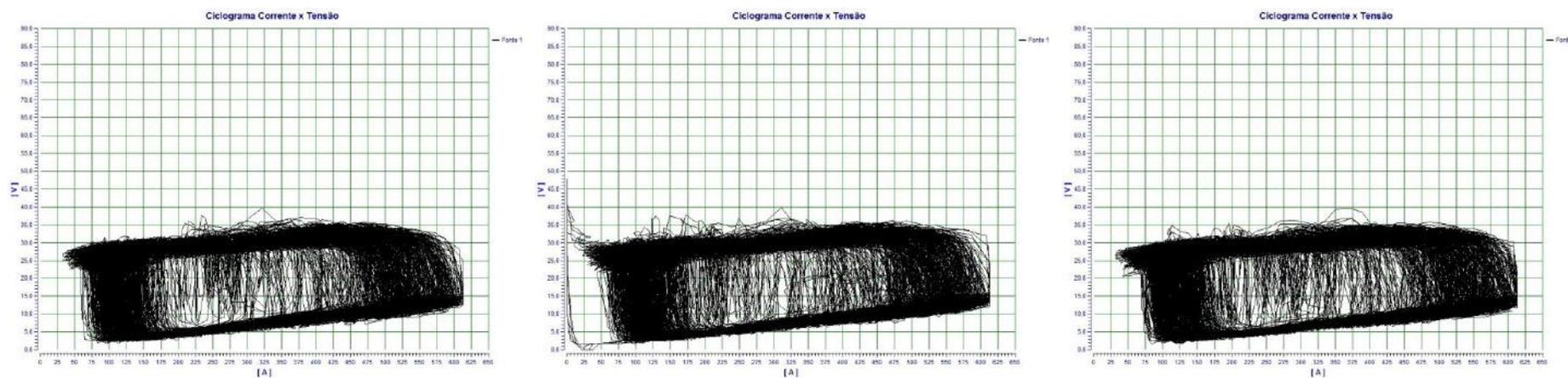


Figura 48: Ciclogramas das soldas em atmosferas CO₂ e CO₂+1,3C₃H₆ no ajuste 2 - etapa III.

4.3.6 Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IVcc)

Esse critério analisa a regularidade da transferência por curto-circuito devido relacionar a constância dos tempos de curto-circuito e de arco aberto. Os resultados obtidos no cálculo do Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IVcc) são mostrados na tabela 35.

Tabela 36: Índice Vilarinho de regularidade da transferência por Curto-Circuito (IVcc) - etapa III.

Atmosferas de Proteção	IVcc		
	CT1	CT2	CT3
		Ajuste 1	
Ar+12CO ₂	2,006	2,415	-
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	2,018	1,507	1,476
Ar+25CO ₂	2,670	3,144	-
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	1,730	1,449	1,385
CO ₂	2,392	3,144	-
CO ₂ + 1,3C ₃ H ₆	1,715	1,751	2,498
		Ajuste 2	
Ar+12CO ₂	1,583	1,521	1,576
Ar+12CO ₂ +0,4C ₃ H ₆	1,576	1,534	1,639
Ar+25CO ₂	1,176	1,219	0,962
Ar+25CO ₂ +0,6C ₃ H ₆	1,469	1,594	1,841
CO ₂	1,619	1,244	0,981
CO ₂ + 1,3C ₃ H ₆	0,916	1,027	0,949

Na figura 49 os resultados do IVcc são plotados em função dos teores de adição de C₃H₆ nas atmosferas de proteção convencionais.

As soldas em Ar+12CO₂+0,4C₃H₆ tem menor IVcc no ajuste 1, indicando maior regularidade da transferência que as soldas em Ar+12CO₂. No ajuste 2 o IVcc das soldas nas duas atmosferas são próximos, indicando semelhança na regularidade da transferência metálica.

As soldas em Ar+25CO₂+0,6C₃H₆ tem menor IVcc no ajuste 1, indicando melhor regularidade da transferência que as soldas em Ar+25CO₂. No ajuste 2, as soldas em Ar+25CO₂ apresentam menor valor do IVcc, indicando melhor regularidade da transferência que as soldas em Ar+25CO₂+0,6C₃H₆.

As soldas em $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ tem menor IVcc nos dois ajustes, indicando melhor regularidade da transferência que as soldas em CO_2 .

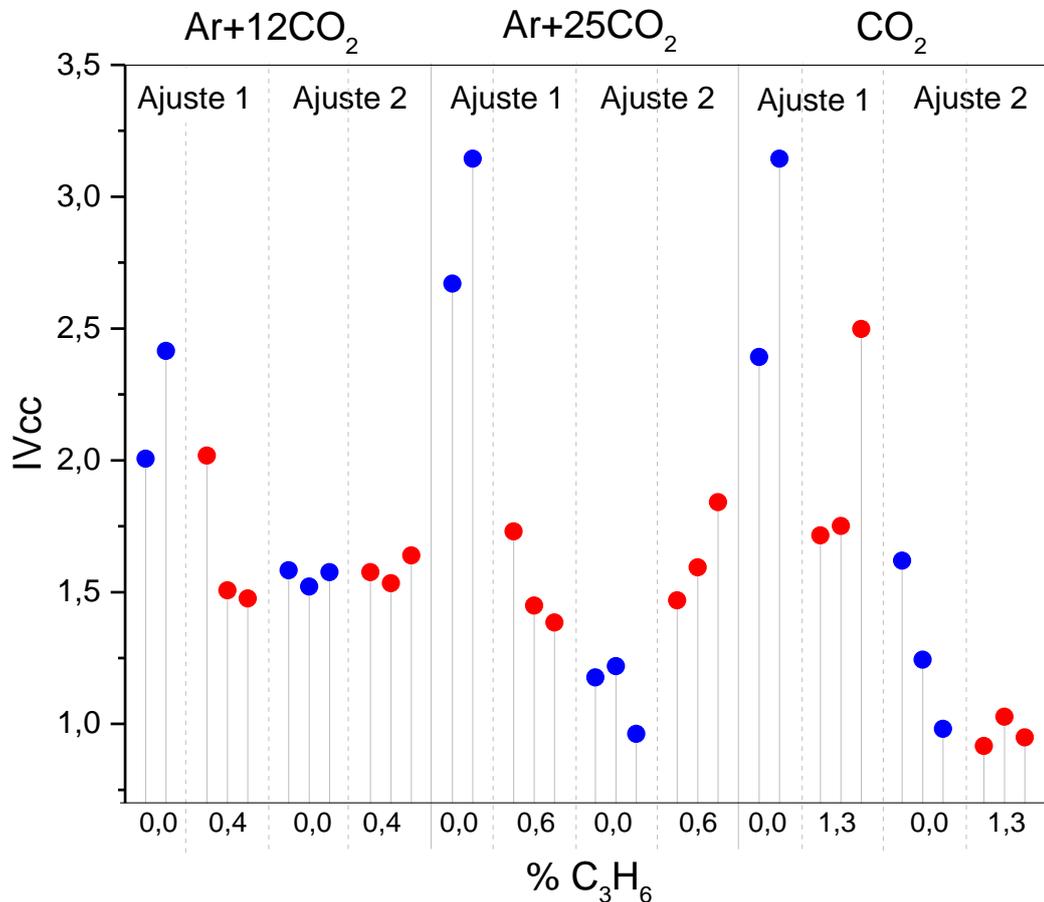


Figura 49: Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IVcc)- etapa III.

Os resultados do IVcc, semelhante ao observado nos demais itens estudados na análise da repetitividade da transferência metálica, permitem identificar a instabilidade provocada pelo aumento do teor de CO_2 nas atmosferas de proteção, no ajuste 1.

No ajuste 2, o comportamento observado é uma tendência de melhoria da estabilidade nas atmosferas convencionais com maior teor de CO_2 , provavelmente devido a maior energia disponibilizada ao sistema agir na regularidade.

As soldas executadas nas atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$ tem resultados do IVcc próximos nos dois ajustes de I x U indicando que provavelmente influenciaram nos nesses resultados.

O comportamento da regularidade da transferência metálica, em função dos ajustes de $I \times U$, mostra que no ajuste 1 o valor do IV_{cc} das soldas em $CO_2+1,3C_3H_6$ se comparado com o das soldas em CO_2 foi maior do que no ajuste 2 devido a maior energia disponibilizada. Ressaltando a necessidade da regulagem de maior tensão na soldagem em atmosferas com gases de maior capacidade térmica, bem como devido serem gases moleculares. Isto porque precisam de maior energia também para ionização. Scotti e Ponomarev (2008) mostram que ao se trabalhar com menor corrente, o alto gradiente $\Delta U/\Delta I$ faz com que qualquer variação no arco represente grandes mudanças nos parâmetros requeridos, levando o arco a instabilidades.

Acredita-se que mesmo com menor energia sendo disponibilizada ao sistema, em função do propileno na atmosfera, foi identificada a manutenção da estabilidade. Embora não se tenha feito o teste para identificar o parâmetro $I \times U$ com maior estabilidade, nas faixas em que foram comparados os cordões de solda, foi possível verificar a influência da atmosfera de proteção.

Estes resultados também são coerentes com os da análise dos tempos de arco aberto e de curto-circuito pois de acordo com Roca *et al.*, (2005) na transferência das gotas metálicas de forma regular para a poça metálica, oscilogramas da corrente e tensão de soldagem são regulares.

A tendência aparente da diminuição dos respingos nas soldas executadas em atmosferas com adições do gás combustível propileno, se comparadas as em atmosferas convencionais, também pode ser associada a estes resultados pois segundo o reportado por Junior (2002) de que é discutido na literatura e observado na prática, no que se refere a formação de respingos, é que estes são gerados frequentemente nos momentos em que a gota toca a peça e durante a reignição do arco. Essa menor facilidade de ocorrência do curto-circuito e de transferência das gotas no curto-circuito, na soldagem em atmosferas com adições de propileno, parece ser mais adequada devido as maiores médias dos tempos de curto-circuito acompanhados de maiores valores das taxas de descida da corrente, para reignição do arco.

4.3.7 Considerações Finais

Os resultados obtidos no estudo da etapa III mostram que:

- Soldas com boa qualidade foram obtidas nos dois ajustes em todas as atmosferas de proteção em estudo nesta etapa.
- A análise dos picos de corrente mostrou uma tendência de que a utilização da regulagem da I x U em dois ajustes, permitiu diminuir a influência desses parâmetros nos critérios. A estabilidade do processo, referente ao ajuste 1, é melhorada com o ajuste 2. Isso ocorre provavelmente devido a maior energia fornecida para o processo.
- As soldas em $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas com as em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ tem resultados dos critérios e índices que mostram melhor estabilidade do processo, mais ressaltantes no ajuste 1.
- As soldas em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas com as em $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ tem resultados dos critérios e índices que mostram melhor estabilidade do processo no ajuste 1 e pior no ajuste 2.
- As soldas em $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ se comparadas com as em CO_2 tem resultados dos critérios e índices que mostram melhor estabilidade no ajuste 1 e 2.

Especificamente no estudo da transferência metálica, as adições de propileno nas atmosferas convencionais de proteção, com exceção das soldas em $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$ no ajuste 2, evidenciam que:

- Aumentaram as médias dos tempos de curto-circuito (t_{cc}) nos dois ajustes de I x U, sendo consideradas uma tendência mais adequada para transferência metálica com melhor estabilidade.
- Diminuíram os DPAA e DPCC, soldas com menor dispersão dos tempos de arco aberto e de curto-circuito.
- Resultaram em ciclogramas mais estáveis nos dois ajustes de I x U.
- Os valores do Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IVcc) são menores, indicando uma possível melhoria da estabilidade do processo.
- Os resultados expressam a influência da atmosfera de proteção utilizada, tendendo a melhoria da estabilidade nestas em atmosferas com adição de propileno se comparadas as em atmosferas convencionais.

4.4 Etapa IV: Caracterização do Metal de Solda Depositado nas Atmosferas de Proteção com Adições do Gás Combustível Propileno

Devido à adição de propileno nas atmosferas de proteção convencionais em estudo, foi realizado nessa etapa um estudo para identificar possíveis alterações na composição química, na microestrutura e na dureza do metal de solda depositado nas atmosferas de proteção $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$, $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$, e $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$.

Em geral, o baixo teor de carbono do metal de adição tem como objetivo a melhoria da soldabilidade por resultar em menor carbono equivalente na composição da zona fundida. Os arames com baixo teor de carbono, como o ER70S-6 são muito utilizados em estruturas soldadas por diferentes processos e em posições de soldagem (Modenesi e Avelar, 1999).

No metal de adição, elementos de liga como o Si e Mn são importantes, pois atuam como desoxidantes durante a soldagem, contribuindo também para minimizar a formação de porosidades. Outra característica desses elementos é promover melhoria da resistência mecânica por sua ação no endurecimento por solução sólida. Os demais elementos são residuais do processo de fabricação dos aços (Marques, 1991; Modenesi *et al.*, 2012). Os teores dos elementos no arame são requeridos pela norma ASME II parte C SFA -5.18M (2007), esta no entanto não especifica a concentração destes elementos no metal de solda.

A tabela 37 mostra os resultados da análise química feita no metal depositado, nas atmosferas em estudo, assim como a faixa de composição química do arame ER70S-6. No metal depositado, devido a ação desoxidante desses elementos, é identificado uma diminuição da concentração dos teores de Mn e Si, mais ressaltante na soldagem em atmosfera $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$. A concentração dos demais elementos são próximas das encontradas no arame.

Foram encontrados nas soldas em $\text{Ar}+12\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\text{CO}_2$ respectivamente os valores de 1,180% Mn, 0,688% Si e 1,120% Mn, 0,605 Si. No trabalho de Tatagiba (2015) foi realizada soldagem de deposição em atmosfera $\text{Ar} + 25\%\text{CO}_2$ obtendo como resultado da análise química um teor aproximado de 1,09% de Mn e 0,59% de Si, se comparados em ambas as soldagens é evidenciado a perda desses elementos. Os percentuais obtidos na soldagem nas atmosferas $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$

e $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$ são ligeiramente maiores do que os encontrados por Tatagiba (2015) na atmosfera convencional $\text{Ar}+25\text{CO}_2$.

Na soldagem em $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$ os valores encontrados foram 0,957% Mn e 0,506% Si, menores se comparados com os valores obtidos por Tatagiba (2015) que foram 1,16% de Mn e 0,63% de Si na solda de deposição em CO_2 .

Tabela 37: Resultados da análise química do metal de solda depositado em função das atmosferas de proteção - etapa III.

Elemento [%] [*]	Atmosferas de Proteção			ARAME
	Ar 12% CO_2 0,4% C_3H_6	Ar 25% CO_2 0,6% C_3H_6	98,7% CO_2 1,3% C_3H_6	ER70S-6
C	0,0128	0,0268	0,0516	0,0600 - 0,1500
Mn	1,1800	1,1200	0,9570	1,4000 - 1,8500
Si	0,6880	0,6050	0,5060	0,8000 - 1,1500
P	0,0050	0,0050	0,0050	0,0250
S	0,0030	0,0030	0,0030	0,0350
Ni	0,0488	0,0422	0,0473	0,1500
Cr	0,0186	0,0175	0,0192	0,1500
Mo	0,0113	0,0108	0,0124	0,1500
V	0,0020	0,0020	0,0020	0,0300
Cu ^d	0,1040	0,0947	0,0999	0,5000
Zr	0,0030	0,0037	0,0031	-
Al	0,0020	0,0020	0,0020	-
Ti	0,0010	0,0010	0,0010	-

d - devido a qualquer revestimento sobre o eletrodo ou haste, acrescido do teor de Cu do próprio metal de enchimento, não deve exceder o declarado 0,50% max.

* - os valores únicos são máximos.

A microestrutura do metal depositado nas atmosferas com adição de propileno foi observada utilizando-se microscopia ótica para identificar a influência desse gás na morfologia da ferrita. As soldas apresentam uma microestrutura diferente do metal base devido ao calor gerado no arco elétrico. Na zona fundida dos aços baixo carbono a ferrita pode apresentar diferentes morfologias (Modenesi *et al.*, 2012).

Na identificação da morfologia da ferrita, a nomenclatura adotada segue as instruções do documento "Instrução para classificação dos Constituintes Microestruturais do Metal de Solda dos Aços Ferríticos, utilizando-se Microscopia Ótica" (Perdigão, 1987). A ferrita de contorno de grão - PF(G) costuma ser o primeiro constituinte a se formar devido à decomposição da austenita, nucleando-se nos

contornos de grão com tamanho de grão relativamente grande. O constituinte ferrita com segunda fase alinhada - FS(A) consiste de ripas paralelas com uma relação aproximada de comprimento/largura superior a 4/1. Já a ferrita com segunda fase não alinhada - FS(NA) consiste de ferrita circundando completamente microconstituintes ou ripas de ferrita acicular. A ferrita acicular - AF apresenta-se como pequenos grãos não alinhados, mantendo em geral uma proporção entre o comprimento e a largura em torno de 2 e 10.

As morfologias encontradas nas soldas em cada atmosfera de proteção são muito parecidas, sendo exemplificadas nas figuras 50, 51 e 52. Pode ser observado uma predominância de ferrita poligonal intragranular (FP(I)), ferrita poligonal de contorno de grão (FP(G)), ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)), ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)) e alguma ferrita acicular (AF).

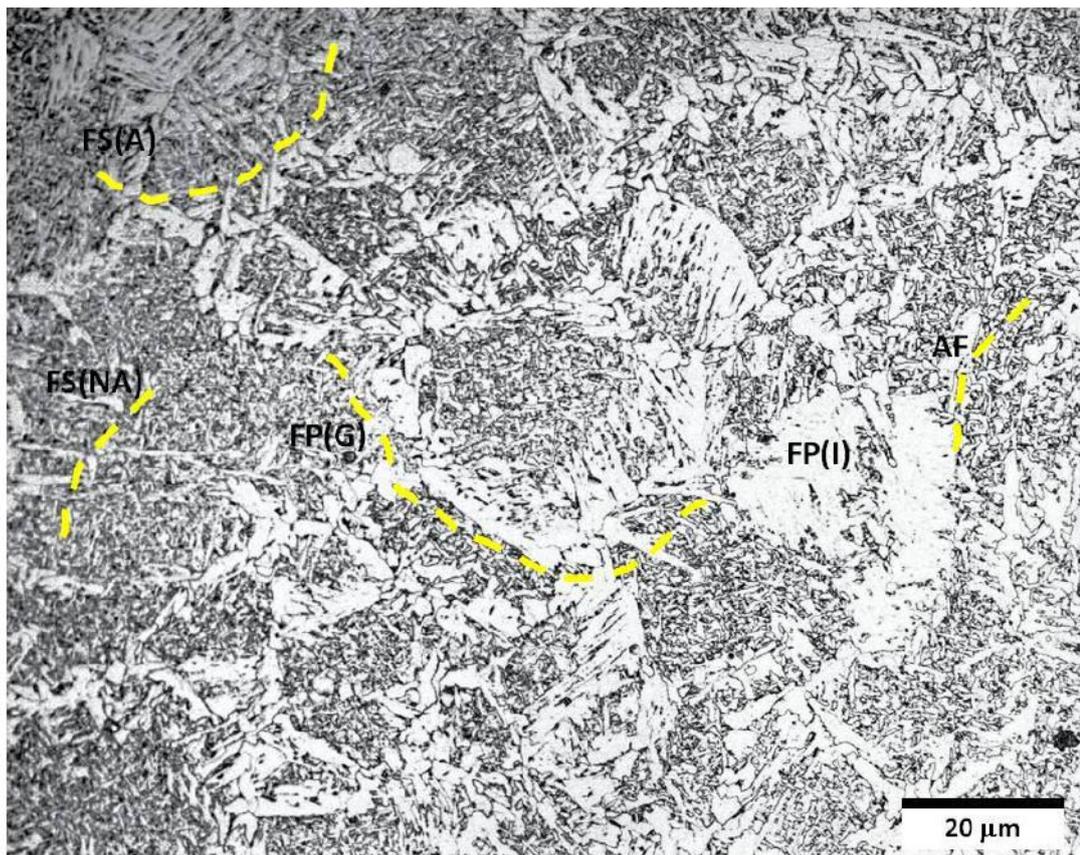


Figura 50: Morfologias da ferrita no metal de solda em atmosfera $\text{Ar}+12\text{CO}_2+0,4\text{C}_3\text{H}_6$.

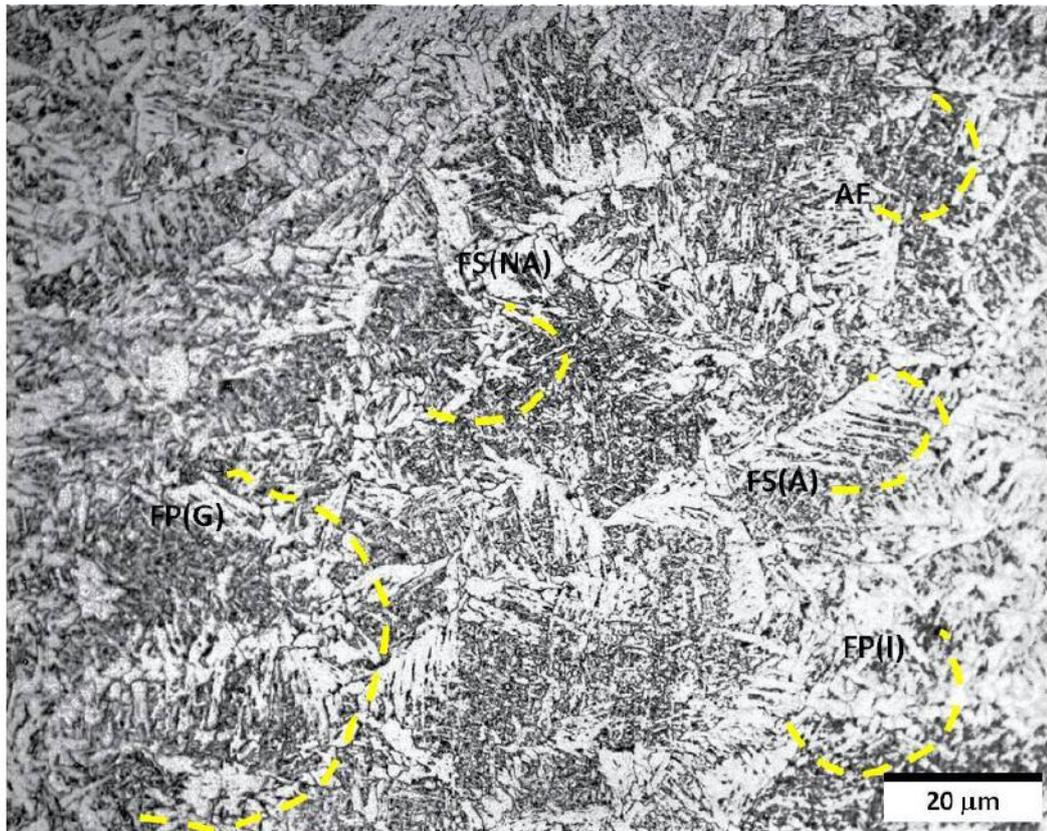


Figura 51: Morfologias da ferrita no metal de solda em atmosfera $\text{Ar}+25\text{CO}_2+0,6\text{C}_3\text{H}_6$.

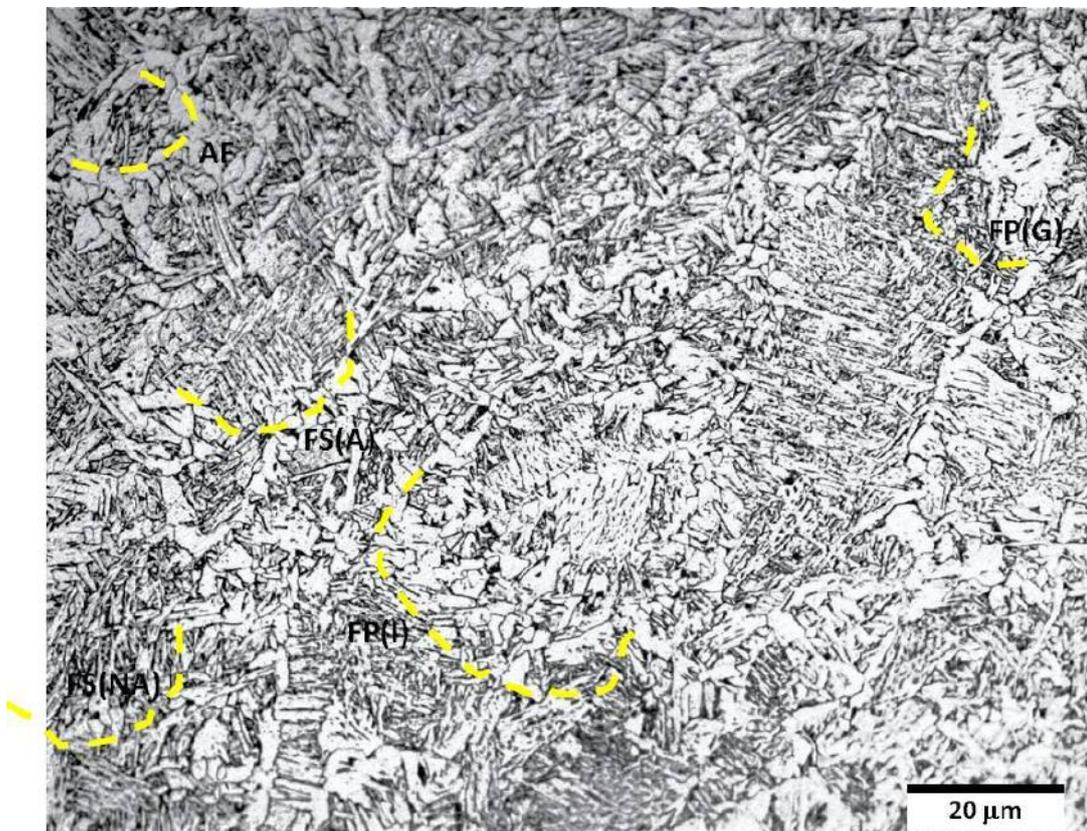


Figura 52: Morfologias da ferrita no metal de solda em atmosfera $\text{CO}_2+1,3\text{C}_3\text{H}_6$.

Comparando-se os tipos de morfologia da ferrita, nas atmosferas de proteção Ar+12CO₂+0,4C₃H₆, Ar+25CO₂+0,6C₃H₆, CO₂+1,3C₃H₆ com os relatados no trabalho de Tatagiba (2015) da soldagem nas atmosferas convencionais Ar+25CO₂, CO₂, não são identificadas mudanças microestruturais significativas como consequência da soldagem nessas atmosferas.

A influência da adição de propileno nas atmosferas de proteção, nas propriedades do metal de solda, foi estudada também através da medição da dureza Vickers. Os resultados deste ensaio são mostrados na tabela 38, onde se observa que as médias dos valores são próximas nas três atmosferas: 209,1 HV nas soldas em Ar+12CO₂+0,4C₃H₆, 184,1 HV em atmosferas_Ar+25CO₂+0,6C₃H₆ e 185,3 HV no metal depositado em CO₂+1,3C₃H₆. Essas médias de dureza são próximas das encontradas por Tatagiba (2015) na soldagem em Ar+25CO₂ que foi 219 HV e em CO₂ que foi 216 HV.

Os valores de dureza ligeiramente maiores no metal depositado em Ar+12CO₂+0,4C₃H₆ pode ser atribuído ao teores de Mn e Si ligeiramente maiores na composição química se comparados aos outros.

A microestrutura observada associada com os resultados de dureza Vickers não indicam a formação de fases frágeis e duras como a martensita nos metais de solda depositados nas atmosferas com adições de propileno.

Tabela 38: Microdurezas do metal de solda.

Medições	Microdureza Vickers		
	Atmosferas de Proteção		
	Ar 12CO ₂ 0,4C ₃ H ₆	Ar 25CO ₂ 0,6C ₃ H ₆	CO ₂ 1,3C ₃ H ₆
1	223,0	170,0	199,0
2	213,0	192,0	188,0
3	205,0	186,0	174,0
4	170,0	181,0	178,0
5	217,0	173,0	178,0
6	202,0	207,0	183,0
7	222,0	192,0	183,0
8	225,0	179,0	193,0
9	193,0	181,0	195,0
10	217,0	170,0	170,0
11	227,0	177,0	181,0
12	191,0	176,0	188,0
13	218,0	180,0	192,0
14	195,0	198,0	186,0
15	219,0	199,0	192,0
Média (HV)	209,1	184,1	185,3

4.4.1 Considerações Finais

Estudando-se a influência da adição de propileno nas atmosferas de proteção convencionais, utilizadas na solda de deposição do arame ER70S-6, não foram identificadas alterações significativas na concentração dos elementos químicos. Embora o gás C_3H_6 tenha características de redutor no arco elétrico, os resultados da análise química revelam que não impediram a oxidação dos elementos Mn e Si, semelhante ao que ocorre na soldagem com atmosferas convencionais. Também não promoveram alterações na microestrutura, que consiste da ferrita com as morfologias características da soldagem dos aços. As durezas obtidas também reforçam a semelhança com os metais depositados em atmosferas convencionais, não evidenciando formação de fases indesejáveis.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

O estudo do efeito das adições do gás combustível propileno nas atmosferas convencionais de proteção, do processo GMAW da soldagem do aço SAE 1020 com transferência metálica por curto-circuito, permite concluir que:

- É possível a adição de até 1% C_3H_6 às misturas $Ar+12CO_2$ e $Ar+25CO_2$ e adição de até 2,5% C_3H_6 ao CO_2 , obtendo-se soldas com bom aspecto visual, adequadas características geométricas e isentas de descontinuidades.
- Nas condições estudadas os teores de adição de propileno que apresentaram melhores resultados referentes a estabilidade foram de 0,5% de C_3H_6 em $Ar+12CO_2$ e $Ar+25CO_2$ e 1,5% de C_3H_6 em CO_2 .
- Utilizando os mesmos parâmetros de corrente e tensão, a qualidade das soldas obtidas nas atmosferas $Ar+12CO_2+0,4C_3H_6$, $Ar+25CO_2+0,6C_3H_6$ e $CO_2+1,3C_3H_6$ pode ser considerada semelhante das obtidas em $Ar+12CO_2$, $Ar+25CO_2$ e CO_2 .
- No que se refere a análise da repetitividade da transferência nas condições estudadas as adições de propileno promoveram maior média dos picos de corrente e da taxa de descida da corrente, menor desvio padrão dos períodos de curto-circuito bem como melhor regularidade da transferência metálica.
- As adições de propileno nas atmosferas de proteção não provocaram alterações significativas na microestrutura, na composição química e no perfil de dureza do metal de solda.
- Nas condições estudadas o efeito das adições de propileno nas atmosferas convencionais, utilizadas na soldagem do aço SAE 1020, evidenciam a melhoria da estabilidade do processo GMAW.

CAPÍTULO 6: SUGESTÕES

Os resultados promissores obtidos neste trabalho, onde foi identificada a família dos gases combustíveis como aditivos às atmosferas de proteção convencionais na soldagem GMAW e estabelecidos alguns dos benefícios produzidos à estabilidade do processo, evidencia um amplo campo de pesquisa a ser explorado. Estes sinalizam o tanto de informações que ainda precisam ser aprofundadas, mostrando a necessidade da pesquisa utilizando essa família de gases que podem conferir ao processo melhorias na estabilidade do arco e da transferência.

Algumas perguntas já surgiram que sugerem novas pesquisas como desdobramento deste trabalho. Especificamente é sugerido:

- Estudar o efeito da adição de outros gases combustíveis às misturas convencionais, como o gás natural, o propano e o butano. Estes também são supostos de apresentar resultados semelhantes aos obtidos com o propileno na estabilidade do processo, mas são gases mais facilmente obtidos e de menor custo que o propileno.

- Estudar o comportamento da transferência metálica por spray, particularmente para a mistura contendo Ar + 12%CO₂, com adição de propileno e de outros gases combustíveis.

- Estudar a geração de respingos e de escória. Este trabalho identificou, de forma qualitativa, que a adição do gás combustível reduz a formação de respingos. Tatagiba (2015) e Menezes (2016), que também trabalharam com esta linha de pesquisa, identificaram que a adição do gás redutor H₂ reduz a quantidade de respingos formados. Um trabalho com este propósito deve ser conduzido.

- Estudar a taxa e os produtos da emissão de fumos durante a soldagem em atmosferas com adição de gases combustíveis. Este aspecto interfere com as questões de segurança e saúde da operação de soldagem, e deve ser avaliado.

- Estudar a estabilidade do processo na soldagem GMAW com adição de gases combustíveis usando equipamento semi-automático, incluindo soldas no interior de juntas chanfradas e em filetes na posição horizontal.

- Estudar a estabilidade do processo na soldagem GMAW com adição de gases combustíveis usando arames mais finos e menores correntes de soldagem.

- Estudar através de espectroscopia, a radiação emitida pelo arco para identificar as espécies químicas que efetivamente são encontradas devido as reações dos gases combustíveis no arco.

- Investigar os aspectos econômicos envolvidos na soldagem em atmosferas de proteção com adição dos gases combustíveis.

CAPÍTULO 7: 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. (2008) *Líquido Penetrante*. Procedimento de END PR-001. Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção. São Paulo -SP.
- Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjö, G., Claesson, I. (1999) On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding. *Welding Research Supplement*. 2: 59s-73s.
- AGA - The Linde Gas Group (2014) *Folha de dados de segurança do propileno*. Disponível em: <<http://www.comercialpitia.com.br/doc/Propylene.pdf>> Acesso em: dez de 2015.
- Alfaro, S.C.A. (2012) Sensors for Quality Control in Welding. *Revista Soldagem e Inspeção*. 17(3): 192-200.
- Anghel. C., Hornlund, E., Hultquist, G., Limback, M. (2004) Gas phase analysis of CO interactions with solid surfaces at high temperatures. *Applied Surface Science* 233: 392-401.
- Anzehaee, M.M., Haeri, M. (2012) A new method to control heat and mass transfer to work piece in a GMAW process. *Journal of Process Control* 22:1087-1102.
- Air Liquide. (2015) *Gas Encyclopedia Air Liquide*. Disponível em: <<http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=54>> Acesso em dez 2015.
- ASME SFA-5.18 / SFA-5.18M/ (2007) *Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*. American Society of Mechanical Engineers.
- Ausloos, P., Eyler, J.R., Lias, S.G. (1975) Thermal energy charge transfer reactions involving CH₄ and SiH₄. Lack of evidence for non-spiralling collisions. *Chemical Physics Letters*. 30(1): 21-25.
- Avillez, R.R., Silva, J.R.G. (1994) Termodinâmica dos sistemas Metal-Gás. In: *Gases em Metais e Ligas. Fundamentos e aplicações na Engenharia*. Cood. Miranda, P.E.V.; Rodrigues, J.A. Editora Didática e Científica LTSA (EDC). RJ.
- AWS A5.32M. (2011) *Welding Consumables - Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes*. 2nd ed. American Welding Society.
- Baixo, C.E.I. (1999) *Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.169p.
- Baixo, C.E.I., Dutra, J.C. (1989) *O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG através de projetor e de Tratamentos Oscilográficos de Tensão*

e Corrente. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, São Paulo - SP. Anais do XV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem. 193 - 210.

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

BISKUP, L., Marchand., Fortain, J., Mouton, J. I. (2003) Process for the MIG welding of nickel and nickel alloys with a shielding gas based on argon and CO₂. Int. Cl. B23K 9/173. US 6,596,971 B1. 6 set. 2001, 22 jul. 2003.

Bottin, B. (2000) Thermodynamic properties of arbitrary perfect gas mixtures at low pressures and high temperatures. *Progress in Aerospace Sciences*. 36: 547-579.

Braga, E.M. (1997) *Soldagem a arame tubular autoprotetido em corrente pulsada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Pará - PA, Universidade Federal do Paraná - UFP, 96p.

Brandi, S. (1995) *Soldagem com gás*. In: Wainer, E; Brandi, S.; Mello, F.D.H. Soldagem. São Paulo: Editora Edgard Blucher, p. 180-216.

Camel, T.de.O., Filgueiras, C.A.L. (2013) A Importância da Lei de Gay-Lussac para a Classificação dos Compostos Orgânicos. *Revista Química Nova*. 36(5): 738-747.

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

Chang, Y.H. (2006) Improve GMAW and GTAW with Alternating Shield Gases. *Welding Journal*. 85(2): 41-43.

Chang, Raymond. (2007) *Química Geral - Conceitos Essenciais*, 4 ed.; São Paulo: McGraw-Hill.

Choi, S.K., Ko, S.H., Yoo, C.D., Kim, Y.S. (1998) Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW - Part 2: Short-Circuit Transfer Mode. *Welding Research Supplement* January. 45s-51s.

Chu, Y.X., Hu, S.J., Hou, W.K., Wang, P.C., Marin, S.P. (2004) Signature Analysis for Quality Monitoring in Short-Circuit GMAW. *Welding Research Journal*. December: 336s-343s.

Cook, G. E., Andersen K., Barrett R. J. (1992) Keynote Address Feedback and Adaptive Control in Welding. *International Trends in Welding Science and Technology*. ASM International: 891-903.

Cook, G.E., Maxwell, J.E., Barnett, R.J., Strauss, A.M. (1997) *Statistical process control application to weld process*. IEEE Industry Applications Society. Mar/Apr (33): 454s- 463s.

- Costa, M.C.M.S., Starling, C.M.D., Modenesi, P.J. (2007) Instabilidade na soldagem GMAW com gases de baixo potencial de oxidação. *Revista Soldagem & Inspeção*. 12(1): 182-187.
- Costa, M.C.M.S., Starling, C.M.D., Modenesi, P.J. (2009) Low oxidation potential shielding gas instability in GMA welding. *Science and Technology of Welding and Joining*. 14: 42-51.
- Curran, H.J. (2009) *Detailed Chemical Kinetic Mechanisms for Combustion*. Proceedings of the European Combustion Meeting. National University of Ireland.
- Den Ouden, G.; Hermans, M.J.M. (1999) Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*. 78(4): 137s-141s.
- Dobignies, A.A. (2008) Estudo do Rendimento de Deposição de Material na Soldagem MIG/MAG em Condições de Transferência Metálica por Curto-Circuito Forçado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Curitiba - PR, Universidade Federal do Paraná - UFPR, 148p.
- Dutra, J. C. (2009) *MIG/MAG - Short circuit metal transfer - welding power sources versus arc gases*. *Welding International*. 23: 231-236.
- Dutra, J.C (2008) MIG/MAG - Transferência Metálica por curto-Circuito - Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. *Revista Soldagem e Inspeção*. 13(1): 019-024.
- Dutra, J.C (1989) Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 178p.
- Dutra, J.C., Silva, R.H. Marques, C. (2013) Características de Fusão e Potência de Soldagem com Transferência MIG - CMT versus MIG Convencional para Alumínio 5183. *Revista Soldagem e Inspeção*. 18(1): 012-018.
- ESAB (2005) Apostila de soldagem MIG/MAG. ESAB Indústria e Comércio Ltda. Disponível em: <http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig3_2.htm> Acesso em Dez 2015.
- Fan, H.G., Kovacevic, R. (1998) *Dynamic analysis of globular metal transfer in gas metal arc welding - a comparison of numerical and experimental results*. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 31(20).
- Filho, D.F., Balsamo, P.S.S., Ferraresi, V.A. (2007) *Influência do Tipo de Gás de Proteção da Soldagem MIG/MAG na Qualidade do Cordão de Aço Inoxidável*. Disponível em: <http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/021008077.pdf> em 03/08/2012 página mantida pela GRIMA - UFSC. Acesso em 22/09/13.
- Fisher, A. (2011) *Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW - arco pulsado*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Belo Horizonte - MG, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 170.

- Good for Gas Company (2013) *Chemical Ionization Potential (eV)*. Disponível em: <http://goodforgas.com/wp-content/uploads/2013/12/TN2004_PID_gas_table_01_16_09.pdf> Acesso em dez de 2014.
- Grad, L., Grum, J., Polajnar, I., Slabe, J.M. (2004) Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44. 555-561.
- Grevey, D., Sallamand, P., Cicala, E., Ignat, S. (2005) Gas protection optimization during Nd:YAG laser welding. *Optics & Laser Technology* 37. 647-651.
- Guile, A. (1984) Electric arcs - Their electrode processes and engineering applications, EIEE Proceedings, Part A - Physical Science, Measurement and Instrumentation. *Management and Education*, 131, pt. A, 7: 450-480.
- Gülenç, B., Develi, K., Kahraman, N., Durgutlu, A. (2005) Experimental Study of The effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas in MIG Welding of Austenitic Stainless Steel. *International Journal of Hydrogen Energy* 30: 1475-1481.
- Helgeson, H.C., Owens, C.E., Knox, A.M., Richard, L. (1998) Calculation of the standard molal thermodynamic properties of crystalline, liquid, and gas organic molecules at high temperatures and pressures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 62(6): 985-1081.
- Hooijmans, J. (1994) *Hydrogen Absorption in Iron and Steel During Gas Tungsten Arc Welding*. Thesis. Ed. The Netherlands: Delft University Technology.
- Hu, J., Tsai, H.L. (2007) Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50. 833-846.
- Hu, J., Tsai, H.L. (2007) Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50. 808-820.
- Ibrahim, I.A., Mohamat, S.A., Amir, A., Ghalib, A. (2012) The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different welding parameters. *Procedia Engineering* 41: 1502-1506.
- lordachescu, D., Quintino, L. (2008) Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology* 202. 391-397.
- Irving, B. (1999) Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding. *Welding Journal*. 78: 37-41.
- Jonsson, P.G., Murphy, A.B., Szekely, J. (1995) The influence of oxygen additions on argon-shielding gas metal arc welding processes. *Welding Journal*. 74(2): 48-58.
- Junior, R.G. (2002) *Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 149p.

- Junior, J.C.S., Luz, M.A.da., Brandi, S.D. (2015) Comparação da Taxa e Eficiência de Deposição entre os Consumíveis ER70S-6 e E71T-1C. *Revista Soldagem e Inspeção*. 20(1): 2-15.
- Kaçar, R., Kökemli, K. (2005) Effect of controlled atmosphere on the Mig-Mag arc weldment properties. *Materials and Design* 26. 508-516.
- Kang, M.J., KIM, Y., Ahn, S., Rhee, S. (2003) Spatter Rate Estimation In The Short-Circuit Transfer Region Of GMAW. *Welding Journal September*. 238-s-247-s. .
- Khalaf, P.I., Souza, I.G., Carasek, E., Debacher, N.A. (2011) Produção de Gás de Síntese por Plasma Térmico via Pirólise de Metano e Dióxido de Carbono. *Revista Química Nova*. 34(9): 1491-1495.
- Kim, Y.S., Eagar, T.W. (1993) Analysis of Metal transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding research Supplement*. June: 269s-278s.
- Lancaster, J.F. (1984) The Physics of Welding. *Physics in Technology*.15: 73-79.
- Lesnewich, A. (1958) Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part I – Control of electrode Melting Rate. *Welding Research Supplement*, Aug. 343-353.
- Lesnewich, A., Dorsch, K.E., Ridge, B., Montrone, E.D. (1970) *Gas shielded arc welding of steel*. Int. Cl. B23k 9/16, 35/38, 9/00. US 3,496,323.
- Lin, Q., Li, X., Simpson, S.W. (2001) Metal transfer measurements in gas metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 34: 347-353.
- Linnert, H.V. (1989) Estudo de espécies transientes em reações iniciadas por laser. Tese (Doutorado em Química) São Paulo - SP, Universidade de São Paulo -USP, 154p.
- Linnert, H.V., Isolani, P.C. (1985) Infrared Laser Decomposition of Diethyl Ether: An End-Product Study. *Artigo Acadêmico Brasileiro*. Cl: 57(4): 402-407.
- Linnert, G.E. (1994) *Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels*. V.1. Fundamentals, 4 Ed. Miami, Florida, USA. American Welding Society.
- Liskévych, O., Scotti, A. (2010) *Adaptação do Cálculo da Frequência de Destacamento das Gotas para Índice de Regularidade da transferência Metálica em MIG/MAG por Curto-Circuito*. In: 20º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia.
- Luksa, K. (2006) *Influence of weld imperfection on short circuit GMA welding arc stability*. *Journal of Materials Processing Technology* 175. 285-290.
- Lyttle, K.A., Stapon, W.F.G. (1990) *Select the best shielding gas blend for the application*. *Welding Journal*. 69(11): 21 - 27.

- Lobato, M.M., Neto, N.A.S. (1993) *Desenvolvimento de um Misturador de Gases de Soldagem e do Programa ROTO_BR*. Projeto (Graduação Engenharia Mecânica) Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 76p.
- Machado, I.G. *Soldagem & Técnicas Conexas: Processos*. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. 477 p.
- Mahan, B.M., Myers R.J. (2005) *Química: um curso universitário*, São Paulo - SP: Editora Edgard Blücher LTDA. 4ª tradução americana, 7ª reimpressão. 592 p.
- Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q. (2009) *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. 3ª ed. Belo Horizonte - MG: UFMG.
- Martins, I.P. (2011) *Redução Sistemática de Mecanismos Cinéticos de Combustão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Porto Alegre - RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 89p.
- Meneses, V.A. (2013) *Efeito da Estabilidade da Transferência Metálica (Respingos) na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito Sobre a Geração de Fumos e Gases*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Uberlândia - MG, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 189p.
- Metghalchi, K.E.H, Keck, J.C. (2011) Thermodynamic Properties of Ionized Gases at high Temperatures. *Journal of Energy Resources Technology June* (133): 022201-1-022201-6.
- Mintusov, E., Serdyuchenko, A., Choi, I., Lempert, W.R., Adamovih, I.V. (2009) Mechanis, of plasma Assisted Oxidation and Ignition of Ethylene-Air Flows by a Repetitively Pulsed Nanosecond Discharge. *Proceedings of the Combustion Institute* 32(2): 3181-3188.
- 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.
- Modenesi. P.J. (2009) *Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. Belo Horizonte - MG, Publicação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Modenesi, P.J., Avelar, R.C. (1999) The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. *Journal of Materials Processing Technology* 86: 226-232.
- Modenesi. P.J.; Costa, M.C.M.S.; Santana, I.J.; Berganholi, J.P.P. (2011) Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito. *Revista Soldagem e Inspeção*. 16(1): 012-021.
- Modenesi. P.J., Marques, P.V. (2000) *Soldagem I: Introdução aos Processos de 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., 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.
- Moreira, A.F. (2008) *Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Ilha Solteira - SP, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, 146p.
- Moyer, N. (2002) The evolution of shielding gas. *Welding Journal*. 76: 51-52.
- Novozhilov, N. M. (1988) *Fundamental Metallurgy of Gas Shielded Arc Welding*. Gordon and Breach Science Publishers S. A. Amsterdam.
- Nussenzveig, Herch Moysés. (2002) *Curso de Física Básica 2: fluidos, oscilações e ondas*, calor. 4ª edição revisada. São Paulo: Edgard Blücher.
- Perdigão, S de C. *Instrução para Classificação dos Constituintes Microestruturais do Metal de Solda dos Aços Ferríticos, Utilizando-se Microscopia Ótica*. ABS. nº16. Abr. Jun.1987.
- Pessoa E.C.P., Dias, W.C., Santos, V.R., Ribeiro, L.F., Andrade, L.G.D., Monteiro, J.M., Bracarense, A.Q., Liu, S. (2010) Arc Stability Indexes Evaluation on Underwater Wet Welding. Disponível em: < http://www.academia.edu/23140242/Arc_Stability_Indexes_Evaluation_on_Underwater_Wet_Welding> Acesso em dez de 2015.
- Pires, I., Quintino, L., Miranda, R.M. (2007) Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. *Materials and Design* 28. 1623-1631.
- Planckaert, J.P., Djermoune, E.H., Brie, D., Briand, F., Richard, F. (2010) Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies. *Applied Mathematical* 34: 1004-1020.
- Quin, T.P., Smith, C., McCowan, C.N., Blachowiak, E., Madigan, R.B. (1999) Arc Sensing for Defections in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding. *Welding Research Supplement September*. 322s-328s.
- Quintino, L., Pires, I. (1996) *Influence of Shielding Gas Composition on Features of the GMAW Process*. Secção de Tecnologia Mecânica, Instituto Superior Técnico. Lisboa IIW Doc. XII-1427-96. p. 219 - 235. Jul.
- Quites, A. M. (2002) *Introdução a soldagem a arco voltaico*. Florianópolis: Soldasoft.
- Quites, A.M., Dutra, J.C. (1979) *Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico*. Florianópolis: EDEME, 248p.

- Ramalho, J. (2008) *Física dos Processos de Soldagem e Corte - Chama para Soldagem e Corte*. São Paulo - SP, Publicação do Curso de Engenharia da Soldagem da Universidade de São Paulo - USP.
- Rao, Z.H., Hu, J., Liao, S.M., Tsai, H.L. (2010) Modeling of the transport phenomena in GMAW using argon-helium mixtures. Part II - The metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 5722-5732.
- Rathwell, I.M. (2001) Tips for better gas metal arc welding. *Welding Journal*, July: 100-101.
- Rezende, G.M.C.; Liskévych, O.; Vilarinho, L.O.; Scotti, A. (2010) *Avaliação de uma metodologia para seleção de parâmetros em soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito*. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande - PB.
- Rezende G.M.C; Liskévych, O.; Vilarinho L.O., Scotti A. (2011) Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. *Soldagem & Inspeção*. 16(2):98-103.
- Roca, A.S.; Fals, H.C.; Fernández, J.B.; Adán, F.S. (2005) Application of U versus I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Transfer Mode. *Revista Soldagem e Inspeção*. 10(2): 85-91.
- Rodrigues, J.A. (1994) *Fundamentos da reação Metal-Gás in: Gases em Metais e Ligas. Fundamentos e aplicações na Engenharia*. Cood. Miranda, P.E.V.; Rodrigues, J.A. Editora Didática e Científica LTSA (EDC). RJ.
- Rosenqvist, T. (1974) *Principles of Extractive Metallurgy*. Japão: Editora McGraw-Hill, 231p.
- Russel, J.B. (1994) *Química Geral*. vol.1. 2ªed. São Paulo: Makron-Books. 621p.
- Scotti, A.; Ponomarev, V. (2014) *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 288 p.
- Scotti, A., Reis, R.P., Liskévych, O. (2012a) Modelo Descritivo do Fluxo de Calor em Soldagem a Arco Visando o Conceito de Calor Imposto Efetivo. *Revista Soldagem e Inspeção*. 17(2): 166-172.
- Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W. (2012) A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology* 212. 1406-1413.
- Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W. (2014) Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification. *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 2488–2496
- Schellhase, M. (1985) *Der Lichtbogen - Ein Technologisches Werkzeug*, DVS – Verlag,Düsseldorf.
- Shinoda, T., Kaneda, H., Takeuchi, Y. (1989) An Evaluation of Short Circuiting Arc Phenomena in GMA Welding. *Welding & Metal Fabrication* December. 522-52.

Silva, D.C.M. "Teoria cinética dos gases"; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/teoria-cinetica-dos-gases.htm>>. Acesso em dez de 2015.

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

Silva, R.H.G., Dutra, J.C., Gohr, R.Jr (2007) Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) - Uma Revisão da Literatura. Parte 1 de 3: Aspectos Históricos e dos Mecanismos de Fusão do Arame. *Revista Soldagem e Inspeção*. 12(3): 237-243.

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

Strohle, J., Myhrvold, T. (2006) Reduction of a Detailed Reaction Mechanism for Hydrogen Combustion Under Gas Turbine Conditions. *Combustion and Flame* 144(3): 545-557.

Solomons, T.W.G. (1996) Química Orgânica. vol. 1. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 777p.

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.

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

Suban, M.; Tušek, J. (2003) Methods for the determination of arc stability. *Journal of Materials Processing Technology* 143-144: 430-437.

Subramanian, S.; White, D. R.; Jones, J. E.; Lyons, D. W. (1998) Droplet transfer in pulsed Gas Metal Arc Welding of aluminium. *Welding Journal*, November: 459-465.

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.

Tatagiba, L.C.S., Gonçalves, R.B., Paranhos, R.P. da R. (2012) Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG-MAG. *Revista Soldagem e Inspeção*. 17(3): 218-228.

The National Institute of Standards and Technology (NIST) is an agency of the U.S. Department of Commerce (2014) NIST Atomic Spectra Database

- Ionization Energies Data. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/ie.pl>> Acesso em dez de 2014.
- 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* 25. 369-376.
- Tušek, J., Suban, M. (2001) *Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. Journal of Materials Processing Technology* 119: 185-192.
- Vaidya, V.V. (2002) Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds. *Welding Journal*. 81(9): 43-48.
- Vlasov, D. (2008) Fundamentos da Combustão. Disponível em: <<http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/motores/downloads/FUNDAMENTOS%20DA%20COMBUST%C3%83O.pdf>> Acesso em Dez de 2015.
- Wainer, E., Brandi, S. D., Mello, F. D. H. (1992) Soldagem - Processos e Metalurgia. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 494p.
- Waszink, J. H., Heuvel, G.J.P.M.V.D. (1982) Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding. *Welding Journal*. 61(8): 269-280.
- Weglowski, M., Huang, Y., Zhang, Y.M. (2008) Effect of welding current on metal transfer in GMAW. *Archives of Materials Science and Engineering*. 33: 49-56.
- White Martins. (2010) WHITE MARTINS PRAXAIR INC: Gases Especiais e Equipamentos. Disponível em: <<http://www.praxair.com.br/gases/specialty-gases>>. Acesso em dez de 2014.
- White Martins (2014) Soldagem ao arco elétrico sob proteção gasosa - processo MIGMAG. Disponível em: <http://www.soldaautomatica.com.br/index_arquivos/Arquivos/PDF%207-WHITE%20MARTINS%20Processo%20MIG-MAG.pdf> acesso em dez. 2014.
- Wiktorowicz, R., Melton, G. (2013) Shielding Gas Selection for Controlled Dip Transfer (Short Arc) Welding. Disponível em: < <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/shielding-gas-selection-for-controlled-dip-transfer-short-arc-welding/>> acesso em dez. 2015.
- Wu, C.S., Polte, T., Rehfeldt, D. (2001) *A Fuzzy Logic System for Process Monitoring and Quality Evaluation in GMAW*. *Welding Research Supplement*. February: 33s-38s.
- Zielińska, S., Valensi, F., Pellerin, N., Musiol, K., Izarra, Ch., Briand, F. (2009) *Microstructural analysis of the anode in gas metal arc welding (GMAW)*. *Journal of Materials Processing Technology* 209. 3581-3591.