

**“FORMULAÇÃO DE GASES DE PROTEÇÃO COM ADIÇÕES DE
GASES REDUTORES PARA A SOLDAGEM MIG-MAG”**

LUIZ CLÁUDIO SOARES TATAGIBA

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais
Centro de Ciência e Tecnologia – CCT
Campos dos Goytacazes – RJ
JULHO - 2015

**“FORMULAÇÃO DE GASES DE PROTEÇÃO COM ADIÇÕES DE
GASES REDUTORES PARA A SOLDAGEM MIG-MAG”**

LUIZ CLÁUDIO SOARES TATAGIBA

“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

JULHO DE 2015

“FORMULAÇÃO DE GASES DE PROTEÇÃO COM ADIÇÕES DE
GASES REDUTORES PARA A SOLDAGEM MIG-MAG”

LUIZ CLÁUDIO SOARES TATAGIBA

“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 31 de julho de 2015

Comissão examinadora:

Prof. José Pinto Ramalho (Doutor, Engenharia de Materiais) – EPUSP/USP

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

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Doutor, Eng. e Ciência dos Materiais) – UENF/CCT

Prof^a. Lioudmila Matlakhova (Doutora, Eng. e Ciência dos Materiais) – UENF/CCT

Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos (Doutor, Eng. e Ciência dos Materiais) – UENF/CCT

DEDICATÓRIA

A minha amada esposa Vânia e minha filha Laís, pela ajuda e por aguentarem os momentos de ansiedade no período que me dediquei ao doutorado.

Aos meus pais Adeildo e Lina, e meu irmão Carlos (in memoriam), que certamente estariam compartilhando comigo a alegria desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos pela oportunidade dada para eu realizar este gratificante trabalho.

Ao corpo docente do LAMAV – UENF que direta e indiretamente me ajudaram durante o doutorado.

Às amigas Renata Barbosa Gonçalves Ribeiro e Elaine Aparecida Santos Carvalho que tanto ajudou na minha jornada na UENF.

Ao meu compadre e amigo Rafael de Andrade Rocha pela ajuda na execução de experimentos.

Ao engenheiro Marcos Lobato e soldadores do Laboratório de Soldagem do Centro de Tecnologia Rio da White Martins pelo espaço, equipamentos e experiência para a execução dos experimentos.

SUMÁRIO

FIGURAS	VIII
TABELAS	XVI
NOMENCLATURAS	XIX
RESUMO	XXV
ABSTRACT	XXVI
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO	2
2.1 Objetivo geral	2
2.2 Objetivos específicos	2
2.3 Justificativas	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Aspectos da física do arco na soldagem MIG-MAG	4
3.1.1 Soldagem a arco elétrico	4
3.1.2 Perfil do arco elétrico	5
3.1.3 Coluna de plasma	6
3.1.4 Oxidação	7
3.1.5 Desoxidação	7
3.1.6 Atmosferas controladas	8
3.1.6.1 Propriedades Físicas e Químicas dos Gases	9
3.1.6.1.1 Dissociação e Ionização	9
3.1.6.1.2 Potencial de Ionização	11
3.1.6.1.3 Condutividade Térmica	12
3.1.6.1.4 Potencial de Oxidação	14
3.2 Estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG	15

3.2.1	Análise de sinais do arco elétrico em soldagem	16
3.2.1.1	Principais métodos de aquisição e análise de sinais do arco elétrico	16
3.2.2	Análise estatística dos sinais do arco elétrico no processo MIG-MAG	21
3.2.3	Índices de estabilidade do arco elétrico	22
3.2.4	Geração de respingos na soldagem MIG-MAG	24
3.3	Gases de proteção utilizados em soldagem	24
3.3.1	Misturas binárias	25
3.3.2	Misturas ternárias	25
3.3.3	Misturas quaternárias	26
3.3.4	Evolução das formulações de gases de proteção com atmosfera oxidante nas últimas décadas	26
3.3.5	Outros Gases Usados na Soldagem	29
3.3.5.1	Gás de Proteção contendo H ₂	29
3.3.5.2	Gás de Proteção contendo N ₂ e NO	31
3.3.5.3	Gases Não Convencionais	32
3.3.5.4	Gases combustíveis	34
3.4	Modelo Oxidante de Atmosfera Gasosa para Soldagem pelo Processo MIG-MAG	35
3.4.1	Elementos Desoxidantes no Metal de Adição	36
3.4.2	Consequências do Excesso de Oxigênio no Gás de Proteção	37
3.4.3	Inclusões no Metal de Solda	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	Materiais	39
4.2	Equipamentos	39
4.3	Metodologia	41
4.3.1	Primeira etapa	41
4.3.1.1	Gases de proteção para soldagem das chapas	41
4.3.1.2	Soldagem das chapas	43
4.3.1.3	Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos através de inspeção visual e por líquido penetrante	43
4.3.1.4	Avaliação das macrografias, Índice de convexidade (IC) e penetração	44

4.3.1.5	Análise da estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos	44
4.3.2	Segunda etapa	45
4.3.2.1	Avaliação da quantidade de respingos produzidos nas soldas	46
4.3.3	Terceira etapa	46
4.3.3.1	Análise química do metal de solda	46
4.3.3.2	Microscopia Ótica	47
4.3.3.3	Microdureza Vickers	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1	Primeira etapa	49
5.1.1	Avaliação do comportamento da tensão e corrente na soldagem com os gases de proteção propostos	53
5.1.2	Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos através de inspeção visual e por líquido penetrante	55
5.1.3	Avaliação das macrografias, Índice de convexidade (IC) e penetração	65
5.1.3.1	Índice de Convexidade (IC)	74
5.1.3.2	Penetração	75
5.1.4	Análise da estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos	77
5.1.4.1	Desvio Padrão de Picos de Corrente (DPPC)	81
5.1.4.2	Desvio Padrão do Período de Arco Aberto (DPAA)	85
5.1.4.3	Desvio Padrão do Período de Curto-circuito (DPCC)	88
5.1.4.4	Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc)	91
5.2	Segunda etapa	95
5.2.1	Avaliação do comportamento da tensão e corrente de soldagem com os gases de proteção propostos	97
5.2.2	Soldagem com os gases Ar+25%CO ₂ e Ar+25%CO ₂ +2%H ₂	98
5.2.2.1	Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos através de inspeção visual e por líquido penetrante	98
5.2.2.2	Análise da quantidade de respingos gerados durante a soldagem	100
5.2.2.3	Avaliação das macrografias, Índice de convexidade (IC) e penetração	101
5.2.2.3.1	Índice de convexidade	103

5.2.2.3.2 Penetração	104
5.2.2.4 Análise da estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos	105
5.2.2.4.1 Desvio Padrão de Picos de Corrente (DPPC)	106
5.2.2.4.2 Desvio Padrão do Período de Arco Aberto (DPAA)	107
5.2.2.4.3 Desvio Padrão do Período de Curto Circuito (DPCC)	108
5.2.3 Soldagem com os gases CO ₂ e CO ₂ +4%H ₂	109
5.2.3.1 Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos através de inspeção visual e por líquido penetrante	109
5.2.3.2 Análise da quantidade de respingos gerados e coletados durante a soldagem	111
5.2.3.3 Avaliação das macrografias, Índice de convexidade (IC) e penetração	112
5.2.3.3.1 Índice de convexidade (IC)	114
5.2.3.3.2 Penetração	115
5.2.3.4 Análise da estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos	116
5.2.3.4.1 Desvio Padrão de Picos de Corrente (DPPC)	117
5.2.3.4.2 Desvio Padrão do Período de Arco Aberto (DPAA)	118
5.2.3.4.3 Desvio Padrão do Período de Curto Circuito (DPCC)	119
5.3 Terceira etapa	121
5.3.1 Análise química do metal de solda	121
5.3.2 Microestrutura do metal de solda	123
5.3.3 Microdureza Vickers	125
5.4 Considerações finais	126
6 CONCLUSÕES	131
7 SUGESTÕES	133
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

FIGURAS

Figura 3.1 – Equipamento básico de soldagem MIG-MAG

Figura 3.2 – Perfil do arco elétrico

Figura 3.3 - Fila de reatividade de alguns metais

Figura 3.4 – Condutividade Térmica de alguns gases em função da temperatura

Figura 3.5 – Tipo de transferência metálica e perfil de penetração em função da condutividade térmica do gás de proteção: (a) hélio; (b) argônio

Figura 3.6 – Modos de transferência no processo MIG-MAG em função da tensão e corrente

Figura 3.7 – Sistema SAP 4.01 de aquisição de dados de soldagem

Figura 3.8 – Painel de conexões da maleta do sistema SAP V4.0

Figura 3.9 – Oscilogramas de tensão e corrente da transferência por curto circuito (a) e globular (b) com arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção CO₂ e goticular (c) com arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Ar-2%O₂

Figura 3.10 – Informações dos histogramas dos sinais instantâneo adquiridos pelo SAP V4.0

Figura 3.11 – Tabela com informações dos sinais médios adquiridos pelo SAP V4.0

Figura 3.12 – Principais reações da combustão estequiométrica de gases combustíveis

Figura 4.1 – Máquina de solda SOLMIG 403-CV NAVY; Analisador de gás Thermco, Sistema de aquisição de dados SAP; Equipamento para mecanização da soldagem

Figura 4.2 – Misturador de gás e rotômetro

Figura 4.3 – Coletor de respingos

Figura 4.4 - Tela do programa ROTO_BR com os cálculos para a mistura $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$

Figura 4.5 – Almofada para análise química do metal de solda

Figura 5.1 – Gráficos Corrente (A) X Tensão (V) das soldas com os gases de proteção propostos

Figura 5.2 - Porosidade produzida nas soldas com gases contendo 8 e 10% de H_2

Figura 5.3 – Chapas 50, 53, 51 e 54 após soldagem com $\text{Ar}+2\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.4 – Chapas 56, 58, 4.1 e 59 após soldagem com $\text{Ar}+4\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.5 – Chapas 61, 64, 62 e 65 após soldagem com $\text{Ar}+6\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.6 – Chapas 67, 70, 68 e 71 após soldagem com $\text{Ar}+8\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.7 – Chapas 1.2, 1.4, 1 e 5.1 após soldagem com $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.8 – Chapas 4.6, 4.3, 4 e 4.4 após soldagem com $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.9 – Chapas 5.2, 5.4, 5 e 5.5 após soldagem com $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.10 – Chapas 6.2, 6.4, 6 e 6.5 após soldagem com $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.11 – Chapas 2.2, 2.4, 2 e 6.1 após soldagem com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

Figura 5.12 – Chapas 7.2, 7.4, 7 e 7.5 após soldagem com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.13 – Chapas 8.1, 8 e 8.4 após soldagem com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$

Figura 5.14 – Chapas 9.1, 9 e 9.4 após soldagem com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.15 – Chapas 3, 3.1, 3.2 e 3.4 após soldagem com CO_2 , após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.16 – Chapas 10, 10.3, 10.1 e 10.4 após soldagem com $\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.17 – Chapas 11, 11.3, 11.1 e 11.4 após soldagem com $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.18 – Chapas 13, 13.2, 12 e 12A após soldagem com $\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.19 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+2%H₂

Figura 5.20 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+4%H₂

Figura 5.21 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+6%H₂

Figura 5.22 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+8%H₂

Figura 5.23 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+10%CO₂

Figura 5.24 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+10%CO₂+2%H₂

Figura 5.25 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+10%CO₂+4%H₂

Figura 5.26 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+10%CO₂+6%H₂

Figura 5.27 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+25%CO₂

Figura 5.28 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+25%CO₂+2%H₂

Figura 5.29 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+25%CO₂+6%H₂

Figura 5.30 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com CO₂

Figura 5.31 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com CO₂+2%H₂

Figura 5.32 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com CO₂+4%H₂

Figura 5.33 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com CO₂+6%H₂

Figura 5.34 – Gráfico Índice de Convexidade X Teor de H₂ no Gás de Proteção para as soldas realizadas com os gases de proteção utilizados na primeira etapa da pesquisa

Figura 5.35 – Gráfico Penetração X Teor de H₂ no Gás de Proteção para as soldas realizadas com os gases de proteção utilizados na primeira etapa da pesquisa

Figura 5.36 – Gráfico Penetração X Corrente de Soldagem para as soldas realizadas com os gases de proteção utilizados na primeira etapa da pesquisa.

Figura 5.37 - Gráfico DPPC x Teor de H₂ no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados

Figura 5.38 - Gráfico DPPC x Teor de H₂ no Gás (a) Ar, (b) Ar+10%CO₂, (c) Ar+25%CO₂ e (d) CO₂ para as tensões de 21,0 V e 22,0 V

Figura 5.39 - Gráfico DPAA x Teor de H₂ no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados

Figura 5.40 - Gráfico DPPC x Teor de H₂ no Gás (a) Ar, (b) Ar+10%CO₂, (c) Ar+25%CO₂ e (d) CO₂ para as tensões de 21,0 V e 22,0 V

Figura 5.41 - Gráfico DPCC x Teor de H₂ no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados

Figura 5.42 - Gráfico DPCC x Teor de H₂ no Gás (a) Ar, (b) Ar+10%CO₂, (c) Ar+25%CO₂ e (d) CO₂ para as tensões de 21,0 V e 22,0 V

Figura 5.43 - Gráfico IVcc x Teor de H₂ no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados

Figura 5.44 - Gráfico IVcc x Teor de H₂ no Gás (a) Ar, (b) Ar+10%CO₂, (c) Ar+25%CO₂ e (d) CO₂ para as tensões de 21,0 V e 22,0 V.

Figura 5.45 – Gráficos Corrente (A) X Tensão (V) das soldas com os gases propostos

Figura 5.46 – Chapas 27, 6, 26, 4, 1 e 2 após soldagem com Ar+25%CO₂, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.47 – Chapas 17, 18, 15, 25, 13 e 14 após soldagem com Ar+25%CO₂+2%H₂, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.48 - Produção de respingos para as soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂

Figura 5.49 – Macrografias dos cordões soldados com Ar+25%CO₂

Figura 5.50 – Macrografias dos cordões soldados com Ar+25%CO₂+2%H₂

Figura 5.51 – Gráfico Índice de Convexidade X Tensão de Soldagem com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂

Figura 5.52 – Gráfico Penetração X Tensão de Soldagem com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂

Figura 5.53 - Gráfico DPPC x Tensão de Soldagem com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂

Figura 5.54 - Gráfico DPAA x Tensão de Soldagem com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂

Figura 5.55 - Gráfico DPCC x Tensão de Soldagem com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂ referentes à primeira e segunda etapa do trabalho

Figura 5.56 – Chapas 11, 12, 9, 10, 7 e 8 após soldagem com CO₂, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.57 – Chapas 23, 24, 22, 19 e 20 após soldagem com CO₂+4%H₂, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante

Figura 5.58 - Produção de respingos para as soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂

Figura 5.59 – Macrografias dos cordões soldados com CO₂

Figura 5.60 – Macrografias dos cordões soldados com CO₂+4%H₂

Figura 5.61 – Gráfico Índice de Convexidade X Tensão de Soldagem com CO₂ e CO₂+4%H₂

Figura 5.62 – Gráfico Penetração X Tensão de Soldagem com CO₂ e CO₂+4%H₂

Figura 5.63 - Gráfico DPPC x Tensão de Soldagem com os gases CO₂ e CO₂+4%H₂ referentes à primeira e segunda etapa do trabalho

Figura 5.64 - Gráfico DPAA x Tensão de Soldagem com os gases CO_2 e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ referentes à primeira e segunda etapa do trabalho

Figura 5.65 - Gráfico DPCC x Tensão de Soldagem com os gases CO_2 e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ referentes à primeira e segunda etapa do trabalho

Figura 5.66 – Micrografias do metal de solda; (a) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$; (b) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$; (c) CO_2 ; (d) $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ - Legenda: 1- PF(G), 2- FS(A) e 3- FS(NA). Aumento de 200X

Figura 5.67 – Micrografias, em malhas de cem pontos, utilizadas para contagem em mil pontos dos constituintes presentes no metal de solda produzido com (a) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$; (b) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$; (c) CO_2 ; $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$. Aumento de 200X

TABELAS

Tabela 3.1 – Potencial de ionização de gases e vapores metálicos em elétron volts (eV)

Tabela 3.2 – Potencial de ionização e condutividade térmica de gases de proteção do arco elétrico em soldagem

Tabela 3.3 – Composições de gases de proteção utilizados em trabalhos científicos e em patentes depositadas

Tabela 4.1 – Requerimentos de análise química para arame ER70S-6 (% em peso)

Tabela 4.2– Microestruturas principais do metal de solda

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem com Ar com adição de 2 a 10% H_2

Tabela 5.2 - Parâmetros de soldagem com Ar+10% CO_2 e Ar+10% CO_2 +2% a 10% H_2

Tabela 5.3 - Parâmetros de soldagem com Ar+25% CO_2 e Ar+25% CO_2 +2% a 10% H_2

Tabela 5.4 - Parâmetros de soldagem com CO_2 e CO_2 +2% a 10% H_2

Tabela 5.5 – Parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas com Ar+2% a 8% de H_2

Tabela 5.6 – Parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas com Ar+10% CO_2 e Ar+10% CO_2 +2% a 6% de H_2

Tabela 5.7 - Parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2% a 6% de H₂

Tabela 5.8 - Parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas com CO₂ e CO₂+2% a 6% de H₂

Tabela 5.9 – Parâmetros de soldagem, DPPC, DPAA, DPCC e para as soldas com Ar mais 2 a 6% de H₂

Tabela 5.10 – Parâmetros de soldagem, DPPC, DPAA, DPCC e para as soldas com Ar+10%CO₂ e Ar+10%CO₂+2% a 6%H₂

Tabela 5.11 – Parâmetros de soldagem, DPPC, DPAA, DPCC e para as soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2% a 6%H₂

Tabela 5.12 – Parâmetros de soldagem, DPPC, DPAA, DPCC e para as soldas com CO₂ e CO₂+2% a 6%H₂

Tabela 5.13 – Corrente, tensão e tempo de soldagem referente à primeira (21,0 e 22,0 V) e a segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0V) das soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂

Tabela 5.14 - Corrente, tensão e tempo de soldagem referente à primeira (21,0 e 22,0 V) e a segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0V) das soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂

Tabela 5.15 – Produção de respingos e parâmetros de soldagem

Tabela 5.16 - Altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e o Índice de Convexidade (IC) das soldas executadas na primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V) com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂

Tabela 5.17 - Tensão e corrente de soldagem, DPPC, DPAA e DPCC referentes a primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V)

Tabela 5.18 - Produção de respingos e parâmetros de soldagem

Tabela 5.19 - Altura do reforço (r), a largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas executadas das soldas executadas na primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V) com os gases CO₂ e CO₂+4%H₂

Tabela 5.20 - Tensão e corrente de soldagem, DPPC, DPAA e DPCC referentes a primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V)

Tabela 5.21 – Composição química do metal de solda depositado com os gases Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂ e Ar+25%CO₂+4%H₂ e especificação do arame ER70S-6

Tabela 5.22 - Contagem dos constituintes encontrados no metal de solda obtido com os gases de proteção Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂ e CO₂+4%H₂

Tabela 5.23 - Valores de microdureza (HV) do metal de solda obtido da soldagem com os gases de proteção Ar+25%CO₂, CO₂ e suas misturas com 2% e 4%H₂

NOMENCLATURAS

α - Fração de átomos de oxigênio que foram ionizados (adimensional)

σ - Desvio padrão

σ_{ab} - Desvio padrão da média do tempo de arco aberto

σ_{cc} - Desvio padrão da média do tempo de curto-circuito

\bar{X} - média aritmética

ΔG - Energia livre ou energia livre de Gibbs

ΔG_0 - Energia livre de dissociação

A – Ampere

AF – Ferrita acicular

Al – Alumínio

Argônio – Ar

b- Largura do cordão

C - Constante de proporcionalidade

C_2H_2 - Acetileno

C_2H_4 – Eteno ou etileno

C_3H_6 – Propileno ou propeno

C_3H_8 – Propano

C_4H_{10} – Butano

C_4H_8 – Buteno

$CBrF_3$ - Freon 13-BI

CCl_2F_2 - Freon 12

$CClF_3$ – Freon 13

CF_4 - Freon 14

CH_4 - Metano

Cloro - Cl

Cr - Cromo

Cu - Cobre

DBCP - Distância do bico de contato a peça

CO_2 - Dióxido de carbono

DPAA - Desvio padrão do período de arco aberto

DPCC - Desvio padrão do período de curto circuito

DPCC - Desvio padrão de picos de corrente

e - Carga do elétron

eV - elétron volts

FC - Agregado Ferrita-Carbeto

FCAW - Flux-Cored Arc Welding

FS - Ferrita com Segunda Fase

FS(A) - Ferrita com Segunda Fase Alinhada

FS(NA) - Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada

g - grama

GLP - Gás liquefeito do petróleo

GMAW - Gas Metal Arc Welding

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding

He - Hélio

H₂ - Hidrogênio

HV – microdureza Vickers

IC – Índice de convexidade

IE - Índice de estabilidade

IVcc - Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito

k - Constante de Boltzmann

K_v – Coeficiente de variação

M - Martensita

MB - Metal de base

Mg - Magnésio

Mig-Mag - Metal Inert Gas - Metal Active Gas

min - minuto

Mn - Manganês

MS - Metal de solda

N_2O – Óxido nitroso

Ne - Neônio

NH_3 - Amônia

N - Nitrogênio

NO - Óxido nítrico

O_3 - Ozônio

O_2 – Oxigênio

p - Pressão em que o gás se encontra

p_0 - pressão atmosférica

PAW - Plasma Arc Welding

PF – Ferrita Primária

PF (G) - Ferrita de Contorno de Grão

PF(I) - Ferrita Poligonal Intragranular

PO – Potencial de oxidação

r - Altura do reforço

R - Constante dos gases

R - Fator de respingos

s - Segundo

SAP - Sistema de aquisição de dados de soldagem

SF₆ - Hexafluoreto de enxofre

Si - Silício

SiO₂ – Dióxido de Silício

SO₂ – Dióxido de enxofre

T - Período de transferência

T - Temperatura absoluta

t_{ab} - Média do tempo de arco aberto

t_{cc} - Média do tempo de curto-circuito

Ti – Titânio

TIG – Tungsten Inert Gas

V - Primeiro estágio de ionização do elemento oxigênio

V - Volt

x - Fração das moléculas de O_2 que foram dissociadas

ZTA - Zona termicamente afetada

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adição do gás redutor hidrogênio (H_2) em misturas com gases convencionais usados na soldagem de aço carbono pelo processo MIG-MAG com transferência por curto-circuito. A pesquisa foi dividida em três etapas com a finalidade de investigar se os gases Ar, Ar+10% CO_2 , Ar+25% CO_2 , CO_2 , com teores de 2 a 10% H_2 , possibilitam a soldagem de aço carbono com uma estabilidade adequada. Escolher e testar as misturas gasosas que obtiveram melhores resultados e examinar se houve modificação do metal de solda produzido também foram escopos desta pesquisa. Os ensaios realizados nas soldas executadas foram inspeção visual e por líquido penetrante, quantificação de respingos produzidos, análise da seção transversal do cordão de solda (largura, reforço e penetração), estabilidade do arco pelos sinais elétricos e análise química, da microestrutura e microdureza Vickers do metal de solda. Os resultados encontrados indicam a possibilidade de soldagem de aço carbono com Ar com no máximo 8% de H_2 , Ar+10% CO_2 com no máximo 4% de H_2 , Ar+25% CO_2 com no máximo 2% de H_2 e CO_2 puro com no máximo 6% de H_2 . Foram selecionadas as misturas Ar+25% CO_2 +2% H_2 e CO_2 +4% H_2 , por apresentarem melhores resultados que as outras utilizadas. A escolha destes gases foi acertada, tendo em vista a boa estabilidade do arco elétrico apresentada, que proporcionou o controle da poça de fusão e atingiu uma boa aparência do cordão de solda. Foi também demonstrado que não houve diferenças significativas na composição química, na microestrutura e na microdureza das amostras de metal de solda produzido com gases Ar+25% CO_2 +2% H_2 e CO_2 +4% H_2 em comparação aos produzidos com Ar+25% CO_2 e CO_2 . As seguintes conclusões foram observadas: é possível a adição de H_2 em gases com significativo potencial de oxidação; foi comprovada a teoria do modelo oxidante na soldagem do aço carbono pelo processo MIG-MAG por curto-circuito, e que a adição controlada de H_2 em misturas oxidantes reduz o potencial de oxidação a um nível em que há a melhora da estabilidade do processo de soldagem; a adição de 2% H_2 no Ar+25% CO_2 e 4% H_2 no CO_2 produziram soldas com estabilidade do processo igual ou melhor que para estes gases comerciais sem adição de H_2 em toda a faixa de tensão e corrente empregada.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of adding hydrogen reducing gas (H_2) in mixtures with conventional gases used in welding carbon steel for MIG-MAG process by short circuit transfer. The study was divided in three steps in order to investigate whether the gases Ar, Ar+10%CO₂, Ar+25%CO₂ e CO₂, with levels of 2% to 10% H₂, permits the welding of carbon steel with an adequate stability. Choose and test the gas mixtures that had better results and examine if there were any change in the weld metal produced were also scopes of this research. The tests conducted in the welds were visual and liquid penetrant inspection, quantification of produced spatter, analysis of cross section of the weld bead (width, reinforcement and penetration), arc stability by electrical signals and chemical analysis, microstructure and hardness Vickers of the weld metal. The found results indicate the possibility of welding carbon steel with Ar with a maximum of 8% of H₂, Ar+10%CO₂ with no more than 4% H₂, Ar+25%CO₂ with no more than 2% H₂ and pure CO₂ with at most 6% H₂. The mixtures Ar+25%CO₂+2%H₂ and CO₂+4%H₂ were selected because they had better results than the others tested. The choice of these gases was correct, in view of good stability presented by the electric arc, which provided control of the weld pool and achieved a good appearance of the weld bead. It was also shown that there were no significant differences in chemical composition, microstructure and hardness of the weld metal samples produced with the gases Ar+25%CO₂+2%H₂ and CO₂+4%H₂ in comparison to those produced with Ar+25%CO₂ and CO₂. The following findings were observed: the addition of H₂ in gases with significant oxidation potential is possible; the oxidant model theory in welding of carbon steel by MIG-MAG process by short-circuit was proven, and that the controlled addition of H₂ in mixtures oxidants decreases the oxidation potential at a level that improves stability the welding process; the addition of 2%H₂ on Ar+25% CO₂ and 4%H₂ on CO₂ produced welds with process stability equal or better than those for commercial gas without the addition of H₂ across the range of voltage and current used.

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem Mig-Mag (Metal Inert Gas - Metal Active Gas) é atualmente utilizado em incontáveis aplicações industriais, tanto em operações de pequena como de grande escala. São grandes usuários do processo MIG-MAG a indústria automotiva e de autopeças, alimentícia, construção civil, fabricação de bens de consumo, estaleiros, caldeirarias, implementos agrícolas, botijões de gás, entre tantas outras. A facilidade de automação e os diversos tipos de materiais que podem ser soldados por este processo ampliam ainda mais as suas aplicações. Nos últimos anos, tem havido um significativo esforço na pesquisa e no desenvolvimento das operações de soldagem envolvendo este processo.

Este processo utiliza gás de proteção, que pode ser inerte, ativo ou mistura destes dois tipos. Segundo sua natureza e composição, têm uma influência preponderante nas características do arco e no tipo de transferência metálica, na velocidade de soldagem, na perda por projeção (respingos), na penetração e formato do cordão de solda e no custo final da operação de soldagem. O tipo de gás também tem influência nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade à fissuração e porosidade, bem como na facilidade da execução da soldagem em diversas posições.

A proposta deste trabalho foi a análise dos resultados de soldagem a arco de aço carbono, utilizando proteção gasosa contendo gases redutores na sua formulação. Para tal, foi necessário o estudo das propriedades físicas e químicas dos gases de proteção, física do arco elétrico, reações de oxidação e desoxidação na poça de fusão da junta soldada, entre outras características.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo de adições de gases redutores na proteção gasosa na soldagem de aço carbono pelo processo MIG-MAG.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- A possibilidade de utilização de gases redutores em soldagem de aço carbono, como por exemplo, o hidrogênio, foi investigado através de análises dos resultados operacionais e metalúrgicos produzidos.
- Análise da estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG com transferência metálica por curto-circuito pela avaliação do aspecto do cordão de solda por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos, estabilidade do arco elétrico, análise química, quantificação das microestruturas e medição de microdureza do metal de solda, servirão como dados para comparação com soldagem utilizando gases de proteção comerciais.

2.3 Justificativas

Os gases de proteção utilizados largamente nas últimas décadas em soldagem são o argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO₂), que podem ser utilizados puros, e oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂) em pequenas quantidades misturadas aos anteriores.

Foram observadas através de pesquisa bibliográfica na literatura técnica e pedidas de patentes das últimas quatro décadas que não houve progresso em relação à utilização de gases de proteção, pois se tem uma variedade de misturas gasosas oxidantes compostas com os principais gases mencionados anteriormente. Na literatura, se observam poucos relatos de resultados em soldagem a arco executadas com proteção de uma atmosfera redutora contendo H₂, nitrogênio (N₂) e Cloro (Cl₂).

O desenvolvimento de gases de proteção com adição de gases redutores para soldagem de aços carbono pelo processo MIG-MAG se torna um tema atraente no que diz respeito ao atendimento de uma área específica da indústria, oferecendo

aumento de produtividade e com uma solda possivelmente isenta de ilhas de escória.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos da física do arco na soldagem MIG-MAG

3.1.1 Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa

A soldagem a arco elétrico é amplamente utilizada na indústria moderna devido as suas características operacionais relativamente simples, baixo custo de equipamentos quando comparados a outros processos de fabricação, além de apresentar riscos aceitáveis para os soldadores e operadores de soldagem. Abrange numerosas aplicações na indústria como, por exemplo, fabricação de equipamentos e recuperação de peças desgastadas.

A soldagem a arco é caracterizada pelo arco elétrico formado entre a peça a ser soldada e o eletrodo. O arco produz um intenso calor que aplicado em duas partes metálicas da junta que se fundem, se misturando diretamente ou com a utilização de um metal de adição.

Uma ampla quantidade de informações pode ser encontrada na literatura sobre soldagem a arco como, por exemplo: James F. Lincoln Welding Foundation, (2000); Paula, (1987); Bingul et al., (2006); Ngo et al., (2007); ESAB, (2005); AWS, (1991); Wainer, (1992); Kin et al., (1993); Praveen, et al., (2005); Wang et al., (2003); Santana, I J. e Modenesi, P. J., (2009); Lesnewich, (1958); ASM Handbook, (1993); Stenbacka e Persson, (1989); Teske, (2006); Marques, (1991); Machado, (1996); Tatagiba, (2009); Quintino e Pires, (1996); Modenesi e Silva, (1995).

A proteção gasosa, utilizada em alguns processos de soldagem a arco, tem como principal função a proteção da poça de fusão de alguns elementos presentes na atmosfera que são prejudiciais à soldagem. A região da solda em fusão deve ser protegida principalmente do oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, pois eles podem provocar respingos, formação de óxidos, nitretos e hidretos, e conseqüentemente, afetar a integridade da solda. Dependendo do processo de soldagem, um ou mais gases podem ser utilizados na proteção da solda. Os gases inertes argônio e hélio são usados puros ou em misturas com gases ativos como oxigênio (O₂) e dióxido de carbono (CO₂) que são utilizados em quantidades menores. Para soldagem de aço carbono, o CO₂ também pode ser utilizado puro.

Abaixo são apresentados alguns exemplos de processos de soldagem com proteção gasosa utilizados na indústria:

- Gas-Shielded Tungsten Arc Welding (GTAW);
- Gas Metal Arc Welding (GMAW) ou MIG-MAG;
- Flux-Cored Arc Welding (FCAW);
- Plasma Arc Welding (PAW).

Na figura 3.1, é mostrado equipamento básico de soldagem MIG-MAG (ESAB, 2005).

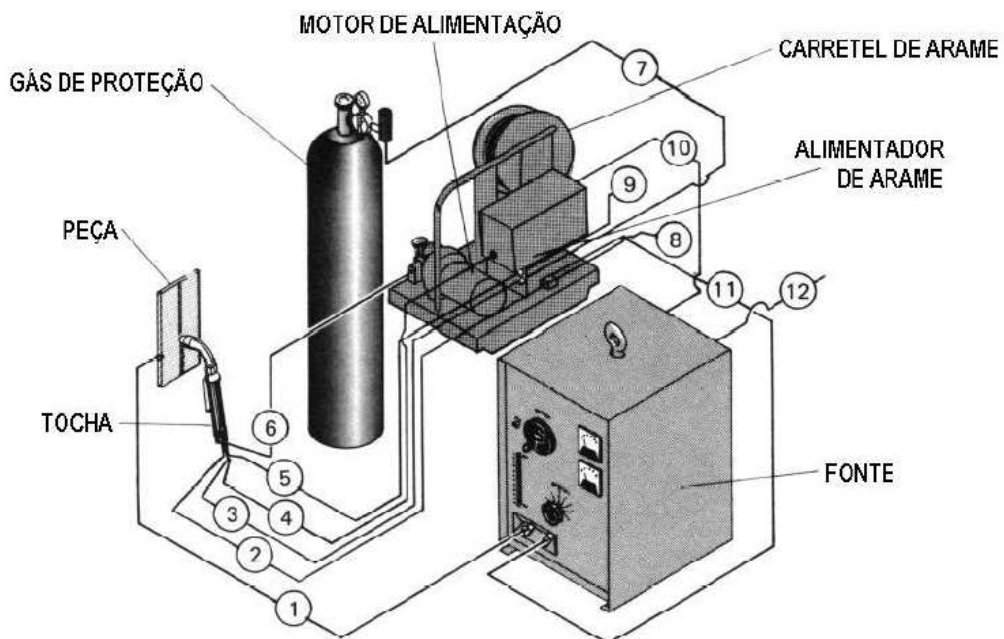


Figura 3.1 – Equipamento básico de soldagem MIG-MAG (ESAB, 2005)

3.1.2 Perfil do arco elétrico

Dentre as fontes de calor utilizadas em soldagem, o arco elétrico é o mais utilizado. Em soldagem de materiais metálicos, a soldagem a arco apresenta vantagens que justificam a sua utilização, entre elas a concentração de energia suficiente para a fusão localizada, facilidade de controle e baixo custo (Modenesi, 2009).

O arco elétrico é produzido devido à emissão de elétrons em quantidade suficiente que mantém a corrente elétrica. A condução elétrica no arco é devida quase integralmente por estes elétrons.

O aquecimento do gás de proteção na região da solda a altas temperaturas permite a ocorrência de choques intensos entre os seus componentes, sendo esta a forma frequente de se obter a ionização no arco de soldagem.

Conforme mostrado na figura 3.2, a queda de tensão ao longo de um arco elétrico não é uniforme, pois há quedas abruptas de tensão junto aos eletrodos (ânodo e cátodo).

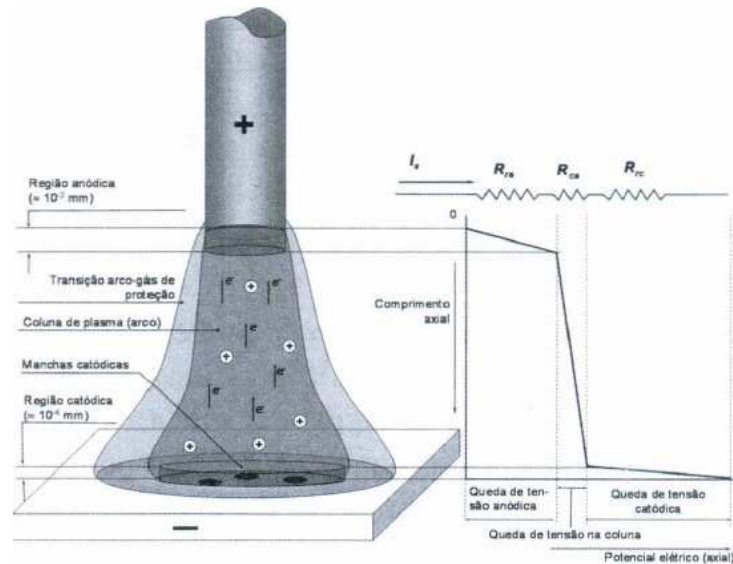


Figura 3.2 – Perfil do arco elétrico (Scotti e Ponomarev, 2008).

3.1.3 Coluna de plasma

O maior volume do arco está localizado na coluna do arco ou de plasma (figura 3.2). Nesta região do arco, são compostas moléculas e átomos (partículas neutras), elétrons livres que são responsáveis pela passagem da corrente elétrica entre o catodo e o anodo, e íons.

Com o aquecimento de um gás, as suas moléculas ganham mais energia e, aumentando mais a temperatura das moléculas, a energia de vibração também aumenta, podendo ocasionar dissociação. Em temperaturas mais elevadas, pode ocorrer a ionização devido à expulsão de elétrons das camadas mais externas. Em temperaturas ainda maiores, mais elétrons são expulsos, ocorrendo uma ionização múltipla (Modenesi, 2009).

Devido às condições citadas anteriormente no arco elétrico serem muito agressivas o método para se estudar o arco elétrico normalmente é realizado de forma indireta, pois os métodos diretos (sondas) provocam distorções no arco impossibilitando resultados desejáveis.

3.1.4 Oxidação e redução

A interação de metais e suas ligas com a atmosfera provocam a oxidação. Isto pode ser explicado como a transferência de elétrons do elemento redutor para o elemento oxidante em seus níveis eletrônicos livres. Os metais são encontrados na natureza em forma de óxidos devido à particularidade de deslocamento de elétrons, característica da ligação atômica metálica (Jardim e Canela, 2004).

O ar atmosférico é composto basicamente de 79% de nitrogênio (N) e 21% de oxigênio (O). A maioria dos metais se combina com o oxigênio quando exposto ao mesmo e com o nitrogênio em menor escala. Esta combinação é maior quanto maior a temperatura, particularmente quando estão no estado fundido, como, por exemplo, em uma operação de soldagem.

A reação química de oxidação é concorrente da reação de redução, ou seja, os elétrons liberados na oxidação são os que serão utilizados na redução. Com o potencial padrão de redução (E°_{red}), se estabelece a ordem de reatividade dos metais. Quanto maior e mais positivo E°_{red} , maior a tendência de acontecer a redução. A figura 3.3 mostra a ordem decrescente de reatividade para os metais (Palma e Tiera, 2003).

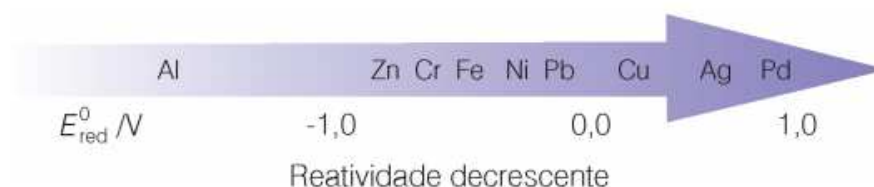


Figura 3.3 - Fila de reatividade de alguns metais (Palma e Tiera, 2003)

3.1.5 Desoxidação

A adição no aço de elementos que são capazes de oxidar, ou seja, remover o oxigênio do óxido de ferro existente é uma forma prática de combater a oxidação. Este procedimento é eficaz na zona fundida na soldagem. A adição de um desoxidante ao aço a ser soldado não o protege do desenvolvimento de uma espessa camada de óxido de superfície, que pode se tornar um grande impedimento para soldagem. Medidas em conjunto com o uso de um desoxidante podem ser adotadas para impedir o contato do ar com o metal de solda aquecido e, assim, minimizar a oxidação do metal sólido e líquido.

Para escolha do elemento desoxidante no aço, se faz inicialmente a análise da energia livre de formação (ΔG) para o óxido de um determinado elemento em comparação com a de óxido de ferro. Por exemplo, o silício produz aproximadamente duas vezes mais energia térmica, quando na forma de sílica (SiO_2), em comparação com óxido de ferro. A sílica formada é bastante estável e tende subir a superfície do metal fundido ou fica aprisionado no metal solidificado. Os desoxidantes frequentemente utilizados para o aço, baseado na sua energia de formação (ΔG^0 expressa em cal/g-mol O_2) de formação de óxidos na temperatura de 2000 K, começando pelo mais forte são: cálcio (CaO , $\Delta F = -193.720$), zircônio (ZrO_2 , $\Delta F = -170737$), alumínio (AlO_3 , $\Delta F = -165000$), titânio (TiO_2 , $\Delta F = -134908$), silício (SiO_2 , $\Delta F = -130300$) e manganês (MnO , $\Delta F = -112000$), (Linnert, 1994).

A escolha do elemento desoxidante e a quantidade adequada dependem de muitos fatores, que dependerá se a adição do desoxidante será feita do metal de base para o metal de adição ou diretamente na poça de fusão.

3.1.6 Atmosferas controladas

A soldagem pode ser executada utilizando proteção gasosa parcial ou total. A proteção da poça de fusão pode ser por um gás inerte não reativo, como o hélio ou argônio, que não formam compostos, ou por um gás resultante de uma reação química que não reage com o metal fundido como, por exemplo, o dióxido de Carbono (Linnert, 1994).

Fatores como custo, facilidade de manuseio, efeitos fisiológicos sobre as pessoas, estabilidade a temperaturas elevadas devem ser considerados para a escolha da atmosfera protetora para soldagem. A solubilidade do gás no metal fundido que se quer proteger durante a soldagem, também deve ser observada, pois se uma quantidade substancial do gás entra no metal fundido pode causar liberação do gás durante a solidificação. Os gases inertes He e Ar não têm praticamente nenhuma solubilidade na maioria dos metais e são muito utilizados como gás de proteção em soldagem.

Dióxido de carbono (CO_2), que é praticamente insolúvel em aço fundido, é amplamente usado em inúmeros processos de soldagem. No entanto, o dióxido de carbono não protege completamente o ferro em altas temperaturas e permite alguma oxidação superficial. Além disso, algumas perdas de elementos oxidáveis em ligas

de aço podem ocorrer durante a soldagem com CO₂. O monóxido de carbono (CO) oferece maior proteção contra oxidação, porém, além de ser tóxico, em muitas circunstâncias poderia carbonizar o ferro e o aço.

O oxigênio também pode ser utilizado como gás de proteção misturado com outro gás como, por exemplo, um gás inerte. Porém possui a desvantagem de aumentar os respingos provocados pela constrição do arco que se torna instável pela ação do resfriamento causado pela reação endotérmica induzida pela decomposição térmica das moléculas de oxigênio (Umehara et. al, 1947).

3.1.6.1 Propriedades Físicas e Químicas dos Gases

Algumas propriedades físicas e químicas dos gases como potencial de ionização, condutividade térmica e potencial de oxidação, entre outras, definem as principais características operacionais do arco de soldagem e as propriedades das soldas. Desta maneira, variação de parâmetros de soldagem como tensão, energia de soldagem, eficiência do arco, entre outros, modifica a geometria do cordão de solda, e estes são intensamente influenciados pela composição química do gás de proteção (Marques et al., 1998).

3.1.6.1.1 Dissociação e Ionização

Para a manutenção do arco elétrico durante a soldagem, é necessário que partículas carregadas eletricamente estejam no espaço consistido entre o eletrodo e a peça. As moléculas de qualquer gás neste espaço deverão ser dissociadas. Devido ao aquecimento do gás, há o aumento da energia de suas moléculas provocado principalmente pelo movimento e vibração das moléculas. Em temperaturas elevadas, esta energia vibracional das moléculas poliatômicas atinge níveis bastante altos, causando a ruptura ou dissociação em átomos. Como exemplo, podemos citar os gases O₂ e CO₂.

Na dissociação, ocorrem reações endotérmicas que absorvem energia, pois a entalpia dos produtos é maior que a dos reagentes. O balanço entre a variação de entalpia e de entropia da reação tem como resultado a variação da energia livre padrão ou energia livre de Gibbs - ΔG (Atkins e Jones, 1997). Já próximo à região da solda, os átomos dissociados reagem com eles mesmos ou com os elementos do metal fundido, provocando um processo exotérmico, que libera energia e provoca o aumento da entropia levando à diminuição da energia livre do sistema, $\Delta G < 0$.

A dissociação da molécula do O₂ pode ser representada pela equação 3.1. Na equação 3.2, é relacionado o grau de dissociação e a temperatura obtida por considerações termodinâmicas. (Lancaster, 1986; Machado, 1996).

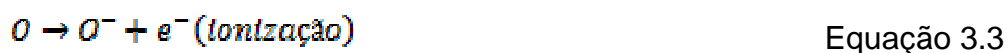


$$\frac{4x^2}{1-x^2} = \frac{p_2}{p} \exp\left(-\frac{\Delta G_0}{RT}\right) \quad \text{Equação 3.2}$$

- x é a fração das moléculas de O₂ que foram dissociadas (adimensional);
- ΔG_0 é a energia livre de Gibbs (J/mol);
- R é a constante dos gases (8,31 J/mol K);
- T é a temperatura absoluta (K);
- p e p_0 são as pressões em que o gás se encontra e pressão atmosférica, respectivamente (atm).

A ionização ocorre após a dissociação em temperaturas mais elevadas ainda quando elétrons das camadas mais externas dos átomos podem ser expulsos. Os choques destes elétrons em alta velocidade provocam a ionização. Em temperaturas mais elevadas, mais elétrons podem ser expulsos, acontecendo ionização múltipla.

A ionização simples de um átomo dissociado pode ser representada pela equação 3.3. A variação de grau de ionização avaliada com a temperatura tem o valor aproximado apresentado na equação 3.4 (Machado, 1996, Modenesi, 2009).



$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = \frac{p_0}{p} C T^{5/2} \exp\left(-\frac{V_i}{kT}\right) \quad \text{Equação 3.4}$$

- α é a fração de átomos de oxigênio que foram ionizados (adimensional);
- T é a temperatura absoluta (K);
- p e p_0 são as pressões em que o gás se encontra e pressão atmosférica, respectivamente (atm).
- C é uma constante de proporcionalidade ($1,264 \times 10^{-6}$ kg/J.s);
- k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

- e é a carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C);
- V é o primeiro estágio de ionização do elemento oxigênio (eV).

As equações apresentadas anteriormente mostram que a fração das moléculas do gás que são dissociadas (x) e a fração de átomos do gás que são ionizados (a) crescem exponencialmente com o aumento da temperatura na coluna de plasma (Modenesi, 2009).

3.1.6.1.2 Potencial de Ionização

Potencial de ionização pode ser definido como a energia total em elétron volts (eV) necessária para extrair o elétron, com menor força de ligação da camada de valência, de um átomo ou molécula que em uma distância infinita estará em repouso (Linnert, 1994).

É uma importante propriedade dos elementos presentes no arco elétrico de soldagem, formada por uma atmosfera complexa devido aos gases de proteção, metais em estado de vapor e elementos utilizados como fluxo. A abertura do arco, a capacidade do arco conduzir corrente elétrica e a estabilidade do arco são determinadas de acordo com a facilidade de ionização destes materiais.

A tabela 3.1 mostra o potencial de ionização de alguns gases comumente utilizados em soldagem, de alguns elementos no estado de vapor e mostra também valores do primeiro e segundo estágio de ionização. É observado nesta tabela que os gases de proteção utilizados em soldagem apresentam potencial de ionização muito maior que elementos metálicos no estado de vapor. Isso pode significar que os metais vaporizados têm grande influência na condutividade elétrica do arco (Lancaster, 1986 e Machado, 1996).

Tabela 3.1 – Potencial de ionização de gases e vapores metálicos em elétron volts (eV) (Lancaster, 1986)

Potencial de ionização (eV)		
Elemento	Estágio de ionização	
	I	II
Alumínio	5,984	18,823
Argônio	15,755	27,620
Cálcio	6,111	11,870
Carbono	11,264	24,376
Césio	3,893	25,100
Hélio	24,580	54,400
Hidrogênio	13,595	–
Ferro	7,90	16,180
Criptônio	13,99	24,560
Magnésio	7,644	15,030
Mercúrio	10,44	18,800
Nióbio	6,77	14,000
Nitrogênio	14,54	29,605
Oxigênio	13,614	35,146
Platina	8,9	18,500
Potássio	4,339	31,810
Silício	8,149	16,340
Prata	7,574	21,480
Sódio	5,138	47,290
Estrôncio	5,692	11,027
Titânio	6,83	13,630
Tungstênio	7,94	–
Xenônio	12,13	21,200

3.1.6.1.3 Condutividade Térmica

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

A figura 3.4 mostra a variação da condutividade térmica dos principais gases utilizados nos processos de soldagem a arco em relação à temperatura absoluta. A condutividade térmica do He é maior que a do Ar, e a do H₂ ultrapassa as duas

(Schwedersky et al., 2011). A figura 3.4 mostra um pico na condutividade térmica na faixa de temperatura entre 3000 e 4500 K devido, principalmente, à dissociação do gás.

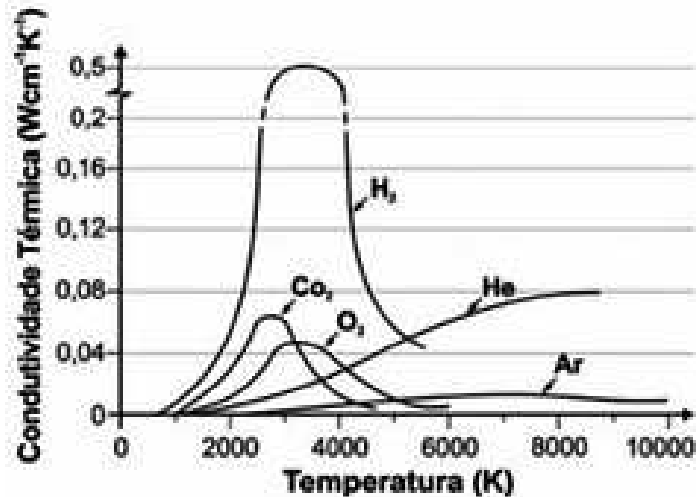


Figura 3.4 – Condutividade Térmica de alguns gases em função da temperatura (Schwedersky et al., 2011)

Entre os gases de proteção utilizados no processo de soldagem MIG-MAG, o argônio é que apresenta menor condutividade térmica para qualquer faixa de temperatura na atmosfera do arco (Suban e Tusek, 2001).

A figura 3.5(a) mostra as características da coluna de plasma em um arco de soldagem com gás de proteção He de alta condutividade térmica, e a figura 3.5(b) com o Ar de baixa condutividade térmica, mostrando a influência desta propriedade na transferência metálica e no perfil de penetração de solda.

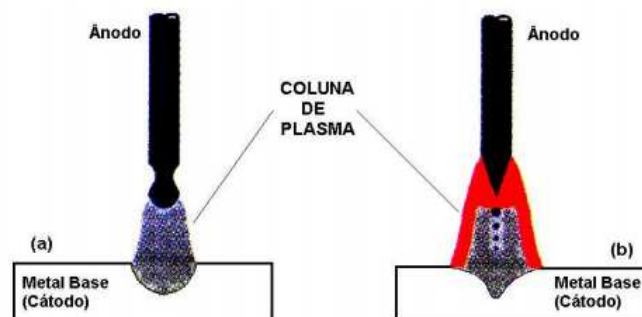


Figura 3.5 – Tipo de transferência metálica e perfil de penetração em função da condutividade térmica do gás de proteção: (a) hélio; (b) argônio (Vaidya, 2002)

A coluna de plasma com argônio como gás de proteção se expandirá além da ponta do arame eletrodo, fundindo rapidamente o eletrodo. Devido a sua condutividade térmica baixa, o gradiente de temperatura entre a região central da coluna de plasma e a região periférica é grande, produzindo um cordão de solda com perfil de penetração centralizada. No arco com hélio, a alta condutividade térmica do gás, devido à baixa concentração de elétrons nas paredes verticais do arame eletrodo e a menor temperatura no ânodo, comparado ao arco com argônio, o estreitamento na ponta do eletrodo é menos provável de ocorrer. Porém o calor é distribuído mais homogêneo no sentido radial da coluna de plasma, garantindo um perfil de penetração espalhado (Vaidya, 2002).

A tabela 3.2 mostra o potencial de ionização (PI) e condutividade térmica (Cv) de gases utilizados normalmente em proteção na soldagem a arco elétrico.

Tabela 3.2 – Potencial de ionização e condutividade térmica de gases de proteção do arco elétrico em soldagem (Scotti e Ponomarev, 2008)

Gás	Símbolo químico	PI (eV)	Cv (kJ / kg°C)
Argônio	Ar	15,8	0,314
Dióxido de carbono	CO ₂	14,4	0,657
Hélio	He	24,6	3,11
Hidrogênio	H ₂	13,5	10,17
Nitrogênio	N ₂	14,5	0,742
Oxigênio	O ₂	13,2	0,653

3.1.6.1.4 Potencial de Oxidação

Potencial de oxidação pode ser definido como a capacidade do gás de proteção oxidar um metal durante a soldagem. Gases e misturas gasosas oxidantes, como, por exemplo, CO₂, Ar+CO₂, CO₂+O₂ e outros são amplamente utilizados industrialmente na soldagem. Nas soldas com estes gases, nota-se uma perda significativa de elementos de liga e impurezas no metal fundido devido à interação com o oxigênio. A oxidação do metal pelo gás de proteção depende da composição de ambos e dos parâmetros de soldagem aplicados (Novozhilov, 1988).

CO₂ e O₂, quando presentes no gás de proteção, aumentam o conteúdo de oxigênio no metal de solda. Entretanto, o potencial de oxidação (PO) varia com a

percentagem volumétrica dos mesmos na mistura e tem influência apreciável na fluidez da poça de fusão, quantidade de fumos, tenacidade e resistência mecânica do metal de solda, entre outras propriedades (Vaidya, 2002). Podemos relacionar empiricamente o PO com o oxigênio no metal de solda pela fórmula 3.5.

$$PO = \%O_2 + \left(\% \frac{CO_2}{2} \right) \quad \text{Equação 3.5}$$

De acordo com a equação 3.5, o potencial de oxidação do CO₂ em misturas gasosas corresponde à metade do potencial de oxidação do O₂ quando este é empregado na mistura. Isto explica o emprego de misturas comerciais de argônio com baixos teores de O₂ em relação ao CO₂. Adições de oxigênio comumente são restringidas a no máximo 8% na mistura para garantir benefícios operacionais (Lyttle e Stapon, 1990).

3.2 Estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG

A avaliação da estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG é baseada no resultado final da solda executada no que diz respeito a níveis aceitáveis de respingos e fumos produzidos, isenção de descontinuidades e aspecto, perfil e penetração do cordão. A quantificação desta estabilidade tem por finalidade a repetição de soldagens com mesmos parâmetros e o seu monitoramento para eventuais ajustes (Scotti e Ponomarev, 2008).

A estabilidade do arco é determinada, principalmente, pelas propriedades físico-químicas de seus constituintes (gás de proteção e consumíveis) no que diz respeito ao potencial de ionização, potencial de oxidação e condutividade térmica, pelo meio ambiente, pelas características da alimentação do arame e pelas características da fonte de soldagem.

Vários métodos são utilizados para verificação da estabilidade do processo de soldagem, entre eles temos:

- 1- Prática do soldador no ajuste da máquina de solda e observação do ruído produzido durante a soldagem;
- 2- Monitoramento e análise de luminosidade produzida;
- 3- Filmagem da região do arco elétrico;
- 4- Monitoramento e análise de sinais elétricos do arco.

Para a avaliação da estabilidade pelos sinais elétricos do arco, consideramos a corrente e a tensão como os mais importantes, além de velocidade de alimentação do arame e vazão do gás de proteção.

Com um sistema de aquisição de dados conectados à máquina de solda e a um software adequado, os dados coletados produzem curvas de tensão e corrente que mostram importantes características do processo de soldagem.

3.2.1 Análise de sinais do arco elétrico em soldagem

A pequena região do espaço em que o arco elétrico está compreendido possui elevadas temperaturas, forte radiação luminosa e ultravioleta, intenso fluxo de matéria e grandes variações de propriedades físicas. Desta maneira, o estudo tanto experimental como teórico do arco elétrico se torna bastante complexo.

3.2.1.1 Principais métodos de aquisição e análise de sinais do arco elétrico

Como exemplo de métodos para análise dos sinais do arco elétrico, se tem a espectroscopia ótica que consiste no exame da variação da intensidade da radiação eletromagnética emitida pelo arco em função do comprimento de onda e a fotografia com tempos de exposição extremamente curtos ou cinematografia de alta velocidade.

A técnica relativamente mais simples de análise do arco é através da aquisição de diferentes sinais gerados pelo arco como tensão e corrente. O número de medidas feitas por segundo é essencial para a reprodução adequada do sinal. Com a aquisição de valores de tensão e corrente, podemos verificar o modo de transferência metálica, a corrente de transição entre transferências metálicas e a estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG.

Três modos principais de transferência metálica são observados no processo de soldagem MIG-MAG: curto circuito, globular e goticular (Spray).

A transferência por curto circuito é provocada quando a gota de metal de adição líquido entra em contato com a poça de fusão extinguindo momentaneamente o arco. A globular é caracterizada pela transferência irregular de gotas com dimensões maiores que o eletrodo em uma frequência muito baixa, sendo que a gota se destaca do eletrodo antes de tocar a poça de fusão (Scotti e Ponomarev, 2008).

Já na transferência goticular, o diâmetro das gotas vai se reduzindo até atingir uma determinada corrente, denominada de corrente de transição, e um considerável aumento na frequência de transferência. Neste modo de transferência, as gotas são direcionadas para a poça de fusão, provavelmente por forças eletromagnéticas originadas no jato de plasma do arco elétrico (Modenesi, 2009).

A figura 3.6 mostra os principais modos de transferência em função da tensão e da corrente na soldagem MIG-MAG, utilizando um gás de proteção à base de argônio (Modenesi, 2009).

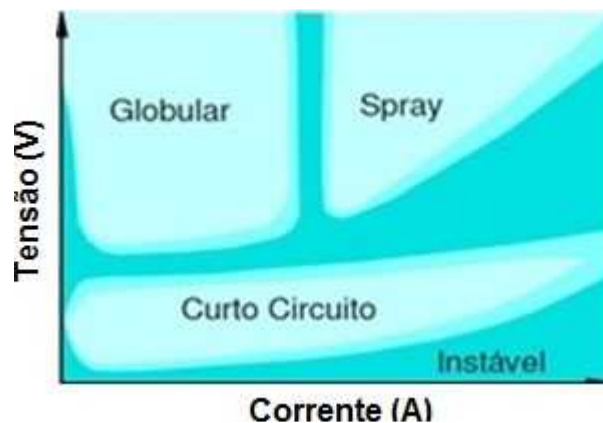


Figura 3.6 – Modos de transferência no processo MIG-MAG em função da tensão e corrente (Modenesi, 2009)

O equipamento de aquisição de dados de soldagem denominado SAP 4.01 (figura 3.7) é um dos existentes no mercado para análise dos sinais elétricos em soldagem a arco. Ele é composto de sensores que medem sinais de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás de soldagem e de um software para aquisição destes sinais (IMC Soldagem, 2005).



Figura 3.7 – Sistema SAP 4.01 de aquisição de dados de soldagem (IMC Soldagem, 2005)

O sistema SAP V4.0 consiste de uma maleta para conexões com a máquina de solda, cilindro de gás de proteção e com um computador onde está instalado um software para manipulação dos dados adquiridos, figura 3.8.



Figura 3.8 – Painel de conexões da maleta do sistema SAP V4.0

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

- 1- Leitura instantânea e de valores médios de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás;
- 2- Avaliação da regularidade da transferência metálica através do comportamento dinâmico das variáveis de soldagem;
- 3- Produção de gráfico de corrente em função da tensão;
- 4- Visualização em tempo real das variáveis tensão e corrente, quantidade de arame e gás consumidos, tempo de soldagem e potência consumida.
- 5- Identificar, através dos gráficos de tensão e corrente em relação ao tempo, o modo de transferência metálica. Na figura 3.9, são mostrados exemplos de oscilogramas com sinais de tensão e corrente característicos da soldagem MIG-MAG com transferência por curto circuito, globular e goticular (spray).

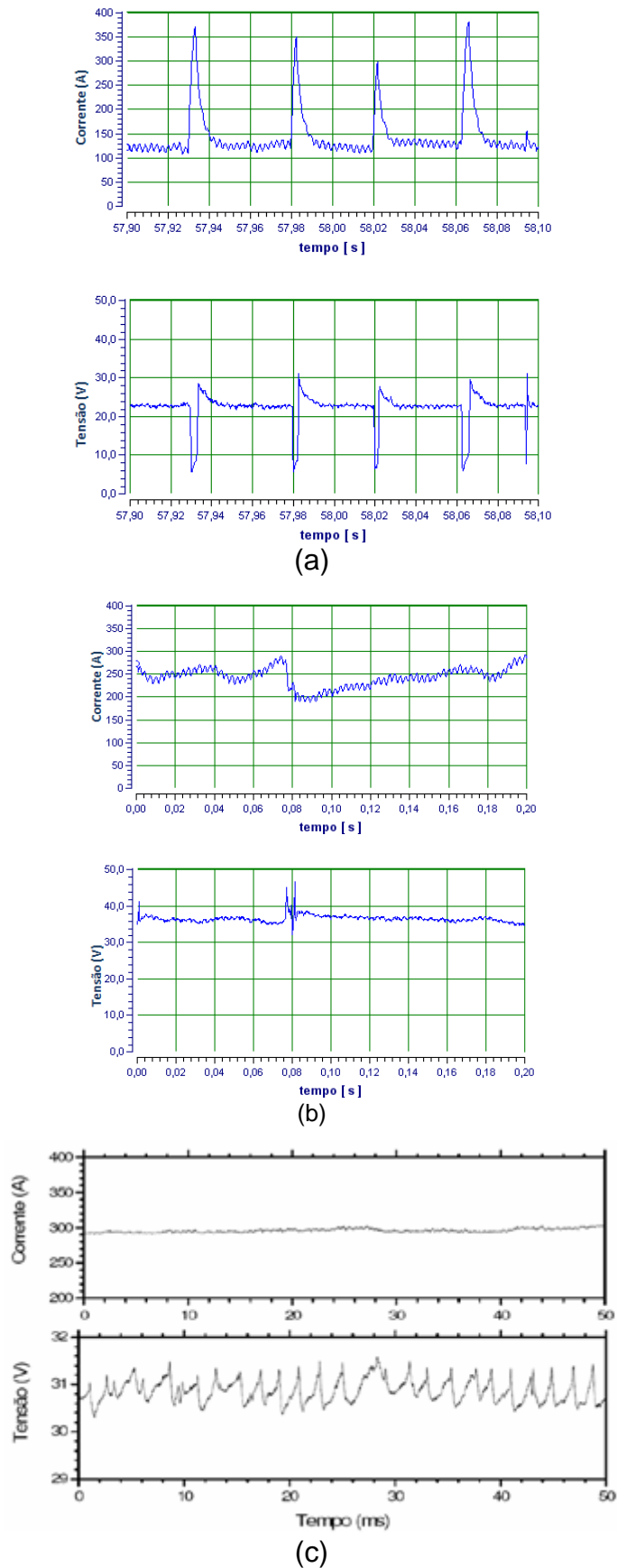


Figura 3.9 – Oscilogramas de tensão e corrente da transferência por curto circuito (a) e globular (b) com arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção CO_2 e goticular (c) com arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção $\text{Ar}-2\%\text{O}_2$ (IMC, 2005; Modenesi, 2009)

Este sistema faz aquisição de sinais instantâneos de tensão e corrente com intervalos de 0,05 s a 50 s, sinais médios em períodos de 60 s a 3600 s, velocidade do arame e vazão do gás de proteção. Com estes dados o programa elabora gráficos sobrepostos, histogramas e gráfico Tensão X Corrente (ciclogramas). Com os histogramas, além da informação visual, são calculados índices estatísticos que fazem uma análise geral dos dados adquiridos e servem de indicativo da regularidade da transferência metálica. São eles:

- Média aritmética (\bar{X}) que é o somatório dos valores medidos de uma variável (x_i) dividida pelo número de medidas (n), conforme equação 3.6:

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

Equação 3.6

- Desvio padrão (σ) identifica e compara a variabilidade de valores medidos e é calculado pela raiz quadrada dos desvios médios quadráticos das medidas em relação ao seu valor médio (equação 3.7):

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

Equação 3.7

- Coeficiente ou taxa de variação de variação (K_v) que é calculado pela razão do desvio padrão pela média conforme equação 3.8:

$$K_v = (\sigma / \bar{X}) \cdot 100\%$$

Equação 3.8

Na figura 3.10 é mostrado uma tela do programa SAP V4.0 com informações do histograma e a figura 3.11 uma tabela dos sinais médios adquiridos.



Figura 3.10 – Informações dos histogramas dos sinais instantâneo adquiridos pelo SAP V4.0

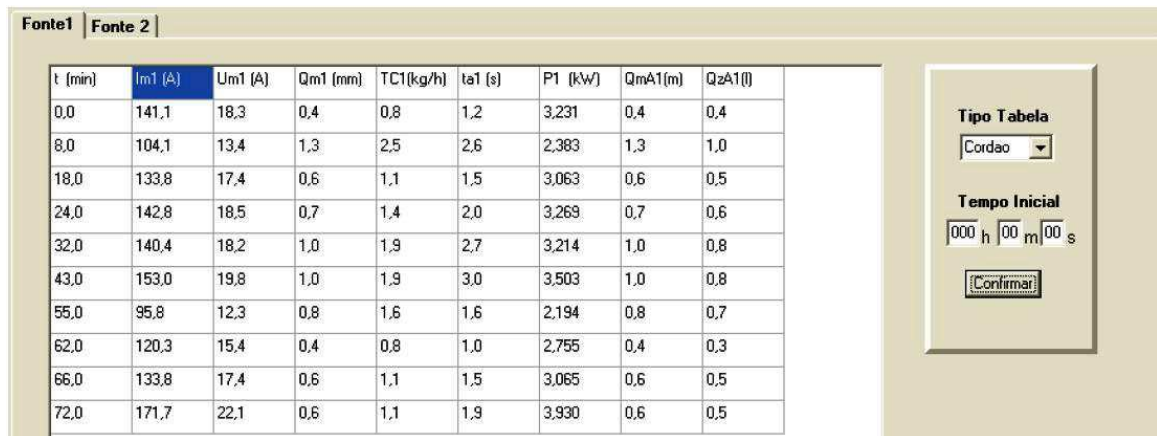


Figura 3.11 – Tabela com informações dos sinais médios adquiridos pelo SAP V4.0

3.2.2 Análise estatística dos sinais do arco elétrico no processo MIG-MAG

Uma das formas de se utilizar a estatística no processo MIG-MAG é avaliando o comportamento operacional, ou seja, modo de transferência metálica, parâmetros elétricos, etc., com a finalidade de se estabelecerem critérios para analisar a estabilidade do processo e qualidade da solda produzida. Valores representativos da amplitude dos sinais coletados e a frequência em que eles ocorrem são obtidos com a aplicação de métodos estatísticos (Scotti e Ponomarev, 2008).

O monitoramento dos sinais elétricos do arco e análise dos oscilogramas e histogramas produzidos juntamente com uma criteriosa análise estatística dos dados encontrados tem resultado satisfatório para avaliação de estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG, pois se considera um processo estável quando é garantida a estabilidade do arco e da transferência metálica simultaneamente.

Dentre os métodos estatísticos utilizados, temos os descritivos por meio de gráficos e dispersão de erros, os aritméticos utilizando médias e desvios padrão e os por estimação probabilística por intermédio de análise de regressão e coeficiente de correlação. O método descritivo e o aritmético são os mais utilizados para a avaliação da estabilidade do processo MIG-MAG (Scotti e Ponomarev, 2008).

Com os métodos descritivos e a utilização de oscilogramas e histogramas, se tem um entendimento do fenômeno que ocorre durante a soldagem e, em conjunto com uma análise estatística, o diagnóstico da estabilidade do processo MIG-MAG se torna mais completa.

Os índices estatísticos mais importantes e que podem ser fornecidos diretamente por sistemas de aquisição de dados existentes no mercado são a média (\bar{X}), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (K_v). Como exemplo da utilidade dos índices estatísticos, é a possibilidade de identificar os modos de transferência metálica no processo MIG-MAG em conjunto com oscilogramas e histogramas gerados na coleta de dados. Considerando soldagens com um mesmo arame e gás de proteção, o desvio padrão será maior para a transferência por curto-circuito, seguido pelo desvio da transferência globular e tendo o menor desvio padrão para a transferência spray (Scotti e Ponomarev, 2008). A estabilidade pode ser considerada máxima quando o desvio padrão da frequência de curto-circuito é mínima (Hermans e Ouden, 1999).

3.2.3 Índices de estabilidade do arco elétrico

A seguir, alguns índices de estabilidade utilizados por autores pesquisadores do assunto elaborados a partir de dados adquiridos pelos sinais elétricos e por parâmetros estatísticos (Souza et al., 2011).

1- Desvio padrão dos picos de corrente, do período de transferência e de tempo de curto-circuito. O desvio padrão dos picos de corrente é o que apresenta maior sensibilidade para irregularidades na transferência metálica. Porém a grande sensibilidade pode resultar em repetibilidade dos valores para um mesmo procedimento de soldagem. Desta forma, o desvio padrão dos picos de corrente pode apresentar variações em torno de 50%.

2- Índice de estabilidade (IE) calculado relacionando o período de transferência (T) e um fator de respingos (R), definido pela razão entre o peso dos respingos e o peso

do metal de adição (metal depositado + respingos). IE é calculado conforme a equação 3.10 (Modenesi e Silva, 1995):

$$IE = 100 / T \times R$$

Equação 3.9

3- Histogramas de períodos de transferência para diversos valores de tensão, relacionando o tipo de distribuição do histograma com a estabilidade do processo que é avaliada pela quantidade de respingos gerada. Quando as condições de operação são adequadas à distribuição de períodos de transferência tende a ser multimodal.

4- Índices de estabilidade baseados em gráficos em forma de laços gerados a partir dos valores instantâneos de coordenadas de tensão e de corrente. A estabilidade do processo é maior quanto mais uniforme é o gráfico.

5- Através de gráficos idênticos aos citados no item 4 calculando a área de cada laço gerado através de um algoritmo, sendo o índice de estabilidade o desvio padrão da média destas áreas calculadas.

6- Índice baseado no sinal de emissão acústica calculado por intermédio dos desvios padrão dos tempos entre curtos-circuitos e das amplitudes dos picos de sinais acústicos dos curtos.

7- Relação entre os respingos gerados durante a soldagem e os sinais elétricos adquiridos. A quantidade de respingos é calculada por regressões lineares e não lineares tendo como fatores de entrada o período de curto-circuito, os tempos de arco aberto, pico de corrente de curto-circuito, corrente instantânea de curto-circuito, corrente média no período de curto-circuito e os desvios padrão destes parâmetros. Neste índice, se deve escolher entre período de curto-circuito e o tempo de arco aberto, bem como seus desvios padrão, para não ocasionar erros no resultado final.

8- Estabilidade do processo avaliando o efeito da indutância em função do gás de proteção utilizado.

9- Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc) que avalia a estabilidade do processo de transferência por curto-circuito. Os tempos em curto-circuito e em arco aberto pouco variam quando o processo está estável. É utilizado para cálculo deste índice o parâmetro estatístico coeficiente de variação. O IVcc é calculado conforme equação 3.10. Quanto menor o valor do índice de regularidade maior a estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG.

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

Equação 3.10

- σ_{cc} = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito;
- σ_{tab} = desvio padrão da média do tempo de arco aberto,
- t_{cc} = média do tempo de curto-circuito;
- t_{ab} = média do tempo de arco aberto.

3.2.4 Geração de respingos na soldagem MIG-MAG

Um parâmetro importante que pode ser utilizado na avaliação da estabilidade do processo MIG-MAG em conjunto com uma análise estatística é a quantidade de respingos gerados durante a soldagem, principalmente, na transferência metálica por curto-circuito. Um aumento muito rápido na corrente no momento do curto circuito causa a ruptura explosiva da parte líquida do arame, provocando o respingo que adere ao equipamento que está sendo soldado. A quantidade excessiva de respingos, além de caracterizar a instabilidade do processo, reduz a produtividade da soldagem devido à perda de material de adição, adesão de respingos na tocha acarreta o aumento do tempo de soldagem devido à necessidade de limpeza da mesma sem contar com a aparência ruim da solda produzida (Souza et al., 2011; Suban e Tusek, 2003).

3.3 Gases de proteção utilizados em soldagem

O gás de proteção tem como principal função a proteção da poça de fusão e das gotas em transferência do ar atmosférico através de um fluxo de gás formado em torno da região fundida da solda. Estabilizar o arco elétrico, controlar a transferência metálica, influenciar na geometria, nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda são funções adicionais também importantes do gás de proteção (Scotti e Ponomarev, 2008).

A composição química dos gases também tem grande influência sobre parâmetros como a tensão de operação, calor gerado, perfil térmico e a eficiência do arco, que, conseqüentemente, influenciam na geometria final do cordão de solda (Marques et al., 1998).

Os principais gases utilizados em soldagem a arco como proteção são os inertes argônio (Ar) e hélio (He) e o reativo dióxido de carbono (CO₂). Eles podem

ser usados puros, misturados entre eles ou com um pequeno acréscimo de outros gases como o hidrogênio (H_2), o nitrogênio (N_2) e o oxigênio (O_2) (ESAB, 2005).

A seguir alguns tipos de misturas de gases de proteção oferecidos no mercado.

3.3.1 Misturas binárias

A soldagem de aços carbonos com a utilização de argônio, com adição de pequenas quantidades de O_2 , como gás de proteção obtêm os seguintes benefícios: estabilidade do arco elétrico, aumento da taxa de fusão do arame, redução da corrente de transição para transferência spray e melhora na molhabilidade e no perfil do cordão de solda.

As misturas argônio-dióxido de carbono são empregadas, principalmente, na soldagem de aços carbono e de baixa liga e em aços inoxidáveis.

Misturas argônio-hélio são utilizadas em soldagem do alumínio, cobre, ligas de níquel e metais reativos. Esses gases misturados em diversas combinações aumentam a tensão e o calor do arco na soldagem pelos processos MIG e TIG enquanto mantêm as características próprias do argônio.

Pequenas quantidades de nitrogênio, adicionadas a misturas Ar / 1% O_2 , proporcionam uma microestrutura completamente austenítica em soldas feitas com metais de adição inoxidáveis.

3.3.2 Misturas ternárias

Como exemplos de misturas ternárias, existem o Argônio-oxigênio-dióxido de carbono, Argônio-dióxido de carbono-hidrogênio, Argônio-hélio-dióxido de carbono, Argônio-hélio-oxigênio.

Misturas contendo Argônio-oxigênio-dióxido de carbono são denominadas misturas universais devido a sua aptidão soldagem com os modos de transferência por curto-circuito, globular e spray.

Na mistura Argônio-dióxido de carbono-hidrogênio, pequenas adições de hidrogênio, entre 1 a 2%, melhoram a molhabilidade do cordão de solda e a estabilidade do arco na soldagem de aços inoxidáveis (ESAB, 2005).

Adições de hélio e dióxido de carbono ao argônio aumentam o aporte térmico na região de solda e melhoram a estabilidade do arco e adição de hélio ao argônio-oxigênio aumenta a energia do arco em soldagem de materiais não ferrosos.

3.3.3 Misturas quaternárias

A mistura Argônio-hélio-dióxido de carbono-oxigênio é utilizada na soldagem MIG de alta deposição. Boas propriedades mecânicas e uma ampla faixa de taxas de deposição são algumas vantagens da utilização desta mistura (ESAB, 2005).

3.3.4 Evolução das formulações de gases de proteção com atmosfera oxidante nas últimas décadas

A utilização de gases apropriados para proteção em operações de soldagem também têm o objetivo de promover a estabilidade do arco elétrico, que está associada aos mecanismos de emissão de elétrons (Costa et. Al, 2009). A estabilidade do arco pode ser medida pelas variações no comprimento do arco, na tensão e na corrente, e pela natureza da forma de transferência metálica. A ausência de compostos de escórias reativas, que resultariam do gás de proteção pode ocorrer ou não uma perda mínima em elementos metálicos assim como a necessidade da remoção de escória (Kooistra, 1960).

As características específicas de cada gás, utilizados individualmente, estimularam no início de 1970 a utilização das misturas de gases (Chang, 2006). Em 1997, a Sociedade Americana de Soldagem (AWS – American Welding Society) publicou a norma AWS A5.32M (AWS, 2011) com o intuito de orientar as aplicações de gases em misturas para proteção em processos de soldagem. A segunda edição desta norma, publicada em 2011, agrupou os gases e misturas de gás para soldagem por fusão e processos afins. Atualmente, ainda pode ser observada a existência de muita pesquisa nesta área, seja através de artigos científicos publicados ou com patentes requeridas. Na Tabela 3.3 são listadas de maneira cronológica, composições do gás de proteção utilizados em trabalhos científicos e em patentes depositadas.

Tabela 3.3 – Composições de gases de proteção utilizados em trabalhos científicos e em patentes depositadas (Tatagiba et al., 2012).

Ano	Ref.	Gás de Proteção	Resultados	
1960	Kooistra, 1960	Ar/He 1-20%CO ₂ /CO	Material: aço carbono (<0,35%C). Obtenção de um cordão de solda muito liso e uniforme. Particularmente quando é adicionado CO ₂ à mistura.	
1964	Wolff e Mantel, 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	Lesnewich, 1970	He 40-60%Ar 1-15%CO ₂	Ar 1-15%CO ₂ 60-80%He	Material: aço carbono. Possibilidade de realizar soldas em todas as posições, obtendo adequadas propriedades de resistência mecânica e tenacidade.
1986	Hilton, 1986	65-95% He 1,75-2,25%CO ₂ 0,25- 1%O ₂	Material: aço carbono. Solda livre de escória e com uma superfície mais limpa.	
1988	Galantino et al.	71-83%Ar 16%-25% He 1-4%CO ₂	Material: aço inoxidável, aços de baixa liga, ligas a base de Ni e metais não ferrosos. Utilizando-se gás de proteção com esta composição, a taxa de deposição de metal é aumentada, com a entrada de energia reduzida, na soldagem por arco pulsado, em operações de soldagem fora de posição.	
1989	Larson et al., 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	Evans e Colvin, 1990	Ar 0,5-1,25%CO ₂ 30-40%He	Material: aço carbono, aço inoxidável, metais não ferrosos. Produz uma solda com aparência superior à obtida com outras misturas, com aspecto liso e com pouca ou nenhuma oxidação, sem instabilidade do arco. A taxa de transferência metálica é alta.	
1991	Schultz et al., 1991	20-65%Ar 30%CO ₂ 5-20%He	Material: aço carbono. Com esta composição do gás de proteção é possível o uso de correntes de até 1000 A, mantendo boa densidade e um formato satisfatório do cordão. Com essas misturas houve baixa formação de respingos e liberação de fumos. A melhor aparência da solda é obtida com correntes maiores que 600 A.	
1992	Hoback e Meyers	Ar 0,1-0,9%CO ₂ 5%-12% He	Material: Super ligas a base de Ni, Co. Capacidade de soldar com uma grande variedade de modos de transferência metálica com a estabilidade do arco excelente, perfil do cordão e a aparência adequada. As características do arco são mantidas de forma a não produzir oxidação excessiva do metal de solda.	
1996	Breymeier	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	Gault	96%Ar 3%CO ₂ 1%O ₂	Material: aço carbono, aço inoxidável. Obtém-se transferência metálica por curto-circuito, por spray entre outras. Com esta composição não ocorre alteração significativa da química do metal de solda.	
2002	Vaidya	Ar	Material: aço carbono, aço inoxidável. O arco de soldagem apresenta-se bastante instável. A solda não tem molhabilidade adequada e são produzidas descontinuidades.	
		Ar CO ₂ O ₂	Material: aço carbono, aço inoxidável. O ₂ melhora a fluidez, molhamento e penetração do cordão de solda. Além da estabilização do arco, as adições progressivas contribuem para a perda de elementos de liga através do arco. Adições de CO ₂ aumentaram as emissões de fumos de soldagem.	
2002	Fortain	Ar 0,01-1,80%O ₂ 20-98,2% He	Material: Al e suas ligas. Transferência por spray, sem corrente pulsada. Proporciona uma elevada produtividade devido à velocidade de soldagem de 110 cm/min em corrente contínua e 105 cm/min em corrente alternada. As juntas soldadas apresentam um baixo nível de inclusões de alumina, e adequadas propriedades mecânicas.	

Tabela 3.3 – Composições de gases de proteção utilizados em trabalhos científicos e em patentes depositadas (Tatagiba et al., 2012) – continuação.

2007	Neff e Lyttle	Ar 6-10%CO ₂ 6-10%He		Material: aço revestido, galvanizado e aço aluminizado. Obteve-se transferência metálica por curto circuito e por spray. Pode ser aplicada com posição de soldagem horizontal ou plana. Promoveu menor quantidade de respingos e porosidade. Cordão de solda com melhor aparência.
2009	Ebrahimnia	97.5% Ar 2.5% CO ₂	82% Ar 18% CO ₂	Material: aço carbono. Com o aumento da porcentagem de CO ₂ no gás de proteção, se verificou o aumento na penetração da solda e a diminuição na quantidade de inclusões.
		90% Ar 10% CO ₂	75% Ar 25% CO ₂	
2009	Costa et al.	Ar 1%O ₂		Material: aço carbono. Em condições com baixa corrente o arco elétrico é instável, com transferência metálica globular e grande formação de respingos. Nos períodos de alta corrente, a transferência por spray foi estável, ocorrendo baixa formação de respingos e um arco mais longo. O processo foi instável e após cerca de 3 a 6 s, tornou-se estável. Esta transição foi caracterizada por um aumento no comprimento do arco (de 4 mm) e da corrente (entre 50-100 A).
2010	Wada e Kamei	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.

De acordo com o mostrado na Tabela 3.3, de uma forma geral, na maioria das composições de gás de proteção estudadas e patenteadas são utilizados o Ar e/ou o He como gases predominantes, e o CO₂ e o O₂ como componentes de misturas para a soldagem de diferentes classes de materiais.

É também indicado na tabela que os teores nas diferentes composições não variam substancialmente e que as faixas de composição previstas em algumas patentes são coincidentes. Nos resultados, se destaca que, para as diferentes classes de materiais e composições do gás de proteção, a melhoria da estabilidade do arco, a diminuição dos respingos e a obtenção de soldas com bom aspecto visual e propriedades mecânicas adequadas são obtidos.

Para soldagem de aços inoxidáveis, o teor de O₂ utilizado no gás de proteção se encontra em faixas próximas ao usado para a soldagem do aço carbono. Em geral, nas patentes requeridas, se afirma que podem ser utilizadas as composições para soldagem de ambos os materiais (Vaidya, 2002; Breymer, 1966; Gault, 2001). A porcentagem em torno de 3% de O₂ é a mais encontrada nas misturas (Vaidya, 2002; Costa et. Al, 2009; Hilton, 1986; Gault, 2001; Fortain, 2002).

O baixo percentual de O₂ indicados em diferentes referências está de acordo com a norma AWS A5.32 (Chang, 2006) que especifica que a porcentagem mais adequada deste gás é de 1% para estabilização do arco. Esta porcentagem de O₂ em misturas com Ar, para soldagem de aços inoxidáveis, se obtém uma taxa maior de transferência metálica pelo modo spray e torna a poça de fusão mais fluida. No

entanto, foi mostrado que é possível alcançar boas propriedades na solda depositada quando este gás está presente em misturas num teor maior (Wolff e Mantel, 1964; Breyemeier, 1966; Wada e Kamei, 2010).

Em relação às adições de CO₂, o teor varia num intervalo de até 30%. As porcentagens mais baixas são para soldagem das ligas de Ni, e metais não ferrosos como o alumínio (Al) (Evans e Colvin, 1990; Galantino e Viri, 1988; Hoback e Meyers, 1992; Fortain, 2002; Neff e Lyttle, 2007).

Nos últimos trinta anos, foram verificadas poucas pesquisas utilizando novos tipos de gases, ou seja, houve pouca inovação nesta área. A inovação observada foi em equipamentos de soldagem que são capazes de controlar a transferência metálica com a modulação do perfil da curva de corrente, obtendo efeitos distintos. Transferência metálica mais uniforme; melhoria do aspecto do cordão e menos respingos; poça de fusão pequena para a soldagem de chapas finas e passe de raiz; obtenção uma relação penetração/taxa de deposição controlada devido a distribuição de calor entre eletrodo e metal base (Scotti e Ponomarev, 2008). Como exemplos destes avanços pode-se citar os processos MIG Pulsado, MIG Pulsado com Comando Sinérgico, MIG com pulsação térmica ou MIG Duplo Pulso, MIG com corrente alternada e MIG/MAG com curto-circuito controlado eletricamente e eletromecanicamente. A tendência observada para o desenvolvimento de gases foi, de acordo com a aplicação, o uso de misturas ricas em gases inertes como o Ar e o He, e adições controladas de elementos oxidantes (O₂ e CO₂).

3.3.5 Outros Gases Usados na Soldagem

A preponderância dos gases que fornecem uma atmosfera ligeiramente oxidante também pode ser observada na norma AWS A5 (Schultz et al., 1991; AWS, 2011). Apenas o N₂ e o H₂ são diferentes dos gases já citados anteriormente. O H₂, o N₂ e o NO (óxido nítrico) são citados como utilizados em aplicações industriais. Também foram encontrados trabalhos utilizando adições de gases diferentes dos mencionados acima, mas sem aplicação industrial. A seguir estes trabalhos serão apresentados.

3.3.5.1 Gás de Proteção contendo H₂

O H₂ é um exemplo de gás redutor que forma uma excelente atmosfera protetora por causa de sua capacidade de redução, sendo muito utilizado em fornos

para tratamento térmico e em operações de brasagem. Em soldagem, o uso do H_2 é indesejável para certas aplicações, principalmente na soldagem do aço carbono, pois este gás é solúvel em certo grau em quase todos os metais, aumentando o risco de trincas a frio.

Devido ao H_2 ter uma condutividade térmica elevada o arco se torna mais condutor durante a soldagem que provoca o aumento da temperatura. Com isto a taxa de resfriamento se torna maior o que pode favorecer a diminuição da dureza (Gülença, 2005). Em compensação, a soldagem com a mistura gasosa de Ar com H_2 , por exemplo, proporciona uma maior penetração e a superfície da solda produzida se mostra limpa e sem óxidos (Suban e Tusek, 2001).

A adição de H_2 ao Ar ou a misturas de Ar/He é empregada na soldagem de ligas de Al, aços inoxidáveis entre outras (Vaidya, 2002). As misturas de Ar/ H_2 com teor de H_2 entre 2 a 5% são muito comuns na Europa em soldagem manual. Teores a partir 5% de H_2 na mistura provocam um aumento elevado da temperatura do processo, o que requer operação de soldagem automática, pois se consegue obter um aumento da velocidade de soldagem (Irving, 1999).

Misturas comerciais de Ar/ H_2 produzem uma atmosfera que reduz a oxidação na superfície do metal de solda durante a soldagem, sendo recomendados para soldagem de aços inoxidáveis teores de no máximo 5% H_2 (AWS, 2011).

Na soldagem de ligas de alto níquel, como Inconel da série 625 e 600, pelo processo MIG-MAG, as dificuldades encontradas são muitas vezes relacionadas à lentidão da formação da poça de solda. Neste caso, devido à produção de mais calor na poça de fusão, a adição de H_2 ao Ar melhora a fluidez da solda (Vaidya, 2002). No gás de proteção com 0,05 – 0,5% CO_2 e 0,1 – 7% de H_2 em Ar, para a soldagem de ligas de Ni, se observou melhor estabilidade do arco e molhamento do cordão de solda (Biskup, 2003). O arco mais estável torna mais concentrado o calor, aumentando a penetração da solda e a velocidade de soldagem, reduzindo significativamente a oxidação superficial dos cordões de solda e, por consequência, tornando dispensáveis operações pós-soldagem.

O H_2 no gás de proteção também é recomendado na soldagem de ligas de Cu (Correia e Costa, 2003) com teores entre 0,2 – 1% na mistura com 0,5 – 4% de CO_2 e equilíbrio em Ar, melhorando o acabamento do cordão de solda, a sua geometria e a soldagem produz menos respingos, pois se obtém transferência metálica pelo modo spray.

Em contraste com dados mostrados na tabela 3.3, para soldagem de aço galvanizado em que se utilizou gás de proteção com O_2 , este gás foi substituído pelo H_2 em experimentos realizados por Macêdo e Correia, 2006. O O_2 é prejudicial, pois colabora para a oxidação do zinco, danificando o revestimento do metal reduzindo assim resistência à corrosão. Outra limitação destas misturas de Ar/O_2 é em relação à estabilidade do arco produzido pelas adições de oxigênio em um intervalo estreito de espessura do revestimento. A proposta foi de uma mistura com 0,5 – 4% CO_2 , 0,2 – 1% H_2 em Ar , onde se obteve a estabilidade do arco com menos respingos, e com a geometria e a aparência adequadas do cordão de solda.

3.3.5.2 Gás de Proteção contendo N_2 e NO

A adição de N_2 pode ser favorável na proteção em soldagem, porém sua aplicação é limitada em uma área específica de operações. Apesar da reação do N_2 sobre o ferro fundido não ser tão intenso como o do ar atmosférico, são formados nitretos na superfície que se dissolvem em certa quantidade no metal fundido. A entalpia do N_2 é elevada em comparação ao H_2 , o que provoca transferência mais intensa de calor para a poça de fusão na soldagem MIG-MAG, porém produz poros. É considerado inerte em baixas temperaturas na soldagem do cobre (Cu). Já na soldagem de ligas de alumínio (Al), magnésio (Mg) e titânio (Ti), ele é reativo com estes metais e deve ser utilizado em pequenas quantidades (Scotti e Ponomarev, 2008).

Na soldagem do aço inoxidável, o N_2 é um elemento estabilizador da austenita, portanto diminui a tendência à formação de ferrita, favorece as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão. Além disso, pode durante um resfriamento rápido, característico em operações de soldagem, formar uma microestrutura muito fina (refinamento de grão). Em soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, utilizando gás de proteção com uma composição de 45% He , 45% Ar e 10% de N_2 , foram observados valores de dureza mais elevados (Sathiya et al., 2012). Em testes com teor de N_2 variando entre 2 e 10% no gás, foi verificado que quanto maior o teor de N_2 menor é a formação de ferrita, maior a resistência à tração e à dureza, sendo a resistência à corrosão mantida (Lin, 2007; Huang, 2009).

Misturas com N_2 e H_2 no gás de proteção também são apropriadas para soldagem dos aços inoxidáveis (AWS, 2011). Os aços inoxidáveis super austeníticos e superduplex são ligados ao nitrogênio e formam uma microestrutura que consiste

de ferrita delta e austenita no metal de solda (Lin, 2007; Huang, 2009). Quando o gás de proteção contém N_2 , as perdas deste elemento no metal de solda podem ser evitadas (Moyer, 2002). A adição de N_2 ao gás de proteção é considerada apropriada quando gera a redução propositada da fase ferrita na soldagem TIG dos aços inoxidáveis duplex e superduplex (Rouault e Diot, 1998). Com teores de 1 a 3% de N_2 no gás de proteção associado a Ar e He, se obtêm um arco estável, o metal depositado apresenta boa resistência à corrosão e é adequado para soldagem manual em todas as posições. A soldagem destes materiais utilizando gás de proteção com adição de N_2 , mesmo em ambientes com alta concentração de cloretos, tem a sua resistência à corrosão por pite aumentada (Kim, 2011).

Já o NO em misturas com Ar é utilizado para reduzir a emissão de ozônio nas proximidades da onde a soldagem é realizada. O gás ozônio (O_3) é extremamente tóxico, pode causar severa irritação nos olhos e nas membranas mucosas e a diminuição de ozônio pode melhorar a qualidade do ambiente. O NO no gás de proteção reage com o ozônio produzido pela radiação do arco, neutralizando-o antes que este entre na zona de respiração do soldador (Dennis, 2002).

Na soldagem do aço inoxidável pelo processo MIG-MAG, a adição de 0,03% NO ao Ar produziu uma redução de até 60% na concentração de ozônio quando comparado com a mistura 93% Ar, 2% O_2 e 5% CO_2 (Dennis, 2002). Também é observada uma redução de 70% na quantidade de cromo (Cr) (VI) emitida. O Cr(VI) supostamente é um elemento carcinogênico. Há também possíveis efeitos úteis sobre concentração, produtividade, consistência e na qualidade da soldagem quando foram feitos ensaios com este gás. O NO estabiliza o arco e tem um efeito positivo na soldagem de aços inoxidáveis e do alumínio.

3.3.5.3 Gases Não Convencionais

A adição de gases não convencionais em gases de proteção para soldagem geralmente são para estudos científicos, objetivando melhorias das características do processo de soldagem e da qualidade da solda.

Na soldagem do Al e suas ligas, foram encontradas algumas misturas com gases não convencionais com adição de 0,05 a 3% de Cl_2 e balanço em Ar ou He. Nesta proposta, foi obtida a eliminação da porosidade e uma redução do custo com o gás de proteção (Wills, 1967). A adição do Cloro em uma quantidade de 0,75% ao Ar, também utilizado em soldagem de Al, foi verificada uma melhora significativa na

estabilidade do arco e na penetração, quando a soldagem é feita com polaridade negativa (Bicknell e Patchett, 1985). Como o cloro é altamente tóxico, foi sugerido como alternativa o uso de freons não tóxicos (combinações de gases de C, F, Cl e Br). Quatro tipos de freons para realização de testes foram escolhidos: Freon 12 (CCl_2F_2); Freon 13 (CClF_3); Freon 13-BI (CBrF_3) e Freon 14 (CF_4). Com a adição de 2,0% de Freon-12 ao gás de proteção há um aumento da intensidade do arco elétrico.

O hexaflueto de enxofre (SF_6) adicionado em uma proporção de e 1 a 50% em gás inerte também foi estudado para soldagem de ligas de Al. Esta mistura tem como benefício reduzir o H disponível para absorção na poça de solda por se ligar ao SF_6 , e pode ser utilizado nos processos de soldagem a arco (Tutle, 2007).

O uso de neônio (Ne) com teor de até 30% da quantidade de He (entre 20-90%) na mistura, associado ao H_2 (0,5 – 2%) foi estudado para soldagem de ligas de aço com estrutura austenítica ou do tipo duplex (Duboz e Demars, 1969). Com este gás de proteção se obtém na soldagem a transferência metálica por spray e por curto-circuito. A poça de fusão formada é bastante fluida, prejudicando soldagens em todas as posições.

Gases radioativos, como o hidrogênio-3 e o criptônio-85, podem ser introduzidos ao gás de proteção Ar ou He, visando a ionizar o arco elétrico além de promover sua estabilidade. A utilização desses gases reduz o tempo de abertura do arco e o torna mais uniforme. O tempo de abertura do arco inclui o tempo necessário para iniciar uma descarga elétrica e o tempo necessário para formar o arco (Mathews, 1963).

Adições de pequenas concentrações de SO_2 ao Ar para soldagem de juntas dissimilares de aços inoxidáveis e aços carbonos se mostram responsáveis por melhorar drasticamente a relação entre a largura e a penetração da solda pelo processo GTAW. O benefício máximo da adição de SO_2 foi alcançado com quantidades entre cerca de 500 e 1400 ppm. No entanto, devem ser tomadas medidas adequadas de segurança já que o gás SO_2 é tóxico (Heiple e Burgardt, 1985).

Os principais problemas que podem acontecer em soldagens que utilizam a proteção com os gases não convencionais estão relacionados diretamente com a segurança de soldadores e operadores de soldagem, pois são na maioria gases tóxicos.

3.3.5.4 Gases combustíveis

Os principais gases combustíveis comercializados no Brasil são (Córner, 2012):

- Gases liquefeitos do petróleo e o gás natural;
- Gás manufacturado reformado;
- Gás de refinaria;
- Gás de coqueria;
- Gás de alto forno;
- O acetileno;
- O hidrogênio;
- Gás de decomposição anaeróbica;
- Gases oriundos da gaseificação da madeira, do carvão vegetal e do carvão mineral.

Os gases liquefeitos do petróleo são denominados para fins comerciais de acordo com sua composição como:

1. Gás liquefeito do petróleo (GLP) composto por uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos (propano, n-butano e isso-butano) e olefínicos (propeno, n-butenos e isso-butenos), em proporções variadas. Pode ter na sua composição também traços de etano, eteno, isso-pentano e butadieno-1,3;

2. Propano (C_3H_8) especial composto basicamente por propano (mínimo 90 %), propeno (máximo 5 %), butanos e butenos, e traços dos hidrocarbonetos mais próximos como no GLP;

3. Propano comercial composto de propano e ou propeno;

4. Butano (C_4H_{10}) comercial, destinado para aplicações em aerossóis e isqueiros a gás. Composto basicamente de butanos e ou butenos, de maneira que sua pressão de vapor não ultrapasse 5 kgf/cm² a 37,8°C;

5. Propileno (C_3H_6), ou propeno, grau químico (95%) ou grau polímero (99,8%) é utilizado em pequena escala como gás para oxi-corte e aplicações afins.

O gás natural distribuído para consumo, após seu processamento, é uma mistura composta por metano (cerca de 90 %), etano (de 5 a 8 %), propano e traços de hidrocarbonetos mais pesados. Apresenta também, em alguns casos, gases inertes como nitrogênio, gás carbônico e hélio. A composição do gás natural também varia de acordo com a sua origem e o seu processamento.

Os gases combustíveis podem ser queimados, utilizando o ar atmosférico ou o oxigênio puro. A figura 3.12 mostra as principais reações da combustão estequiométrica destes gases.



Figura 3.12 – Principais reações da combustão estequiométrica de gases combustíveis (Córner, 2012)

3.4 Modelo Oxidante de Atmosfera Gasosa para soldagem pelo processo MIG-MAG

A oxidação é provocada pela interação dos metais e suas ligas com o meio ambiente. Este fenômeno pode ser explicado pela transferência de elétrons do elemento redutor para o elemento oxidante em seus níveis eletrônicos livres. Quanto maior a temperatura, maior é esta combinação, como podemos observar numa operação de soldagem na região fundida da solda. Os metais são encontrados na natureza em forma de óxidos devido à característica de deslocamento de elétrons que é uma propriedade da ligação atômica metálica (Jardim e Canela, 2004).

O modelo oxidante de atmosfera gasosa é característico na soldagem MIG-MAG dos aços. Neste modelo, os filmes de óxidos com espessura microscópica localizada na superfície do cátodo (-), região situada entre a coluna de plasma e a peça a ser soldada, têm uma importância efetiva na emissão de elétrons (Tatagiba et al., 2012). Os elétrons são emitidos por camadas de óxidos existentes sobre a poça fundida e nas redondezas que naturalmente apresenta ligações eletrônicas mais fracas que a do metal de base. Este fenômeno é conhecido como emissão catódica e tem como explicação que a tensão localizada, criada entre esta camada e o metal de base, proporciona o agrupamento e aceleração dos elétrons em direção ao anodo (+), região do arco compreendido entre a coluna de plasma e eletrodo

consumível. A tensão entre o eletrodo e a peça não é muito alta e como consequência da aceleração dos elétrons, a camada de óxido é quebrada e retirada provocando o deslocamento dos elétrons pela coluna de plasma até o anodo (Scotti e Ponomarev, 2008).

Na soldagem de aços pelo processo MIG-MAG, o arco tende a se desviar para longe das camadas de óxidos, quando estas são consumidas, em busca de novas regiões que possuam filmes óxidos para a emissão de elétrons. Este efeito pode reduzir a estabilidade do arco. Para que a camada de óxido seja regenerada suprimindo este efeito, é feita a adição de gases oxidantes (O_2 ou CO_2) na mistura de proteção, pois a propriedade PO do gás de proteção é de grande importância na soldagem MIG-MAG dos aços (Modenesi, 2009; Scotti e Ponomarev, 2008). Na soldagem de metais altamente oxidáveis, como o Al, Mg e Ti, a adição de gases oxidantes não é necessária.

Contrastando com gases oxidantes, tem o gás redutor. Este é um gás que não só protege o metal aquecido de oxidação como também reduz qualquer óxido que possa já existir na superfície do metal. O hidrogênio e o nitrogênio são exemplos de gases redutores. Porém, os gases redutores na soldagem pelo processo MIG-MAG se comportam como gases inertes quando a estabilidade do arco é avaliada (Scotti e Ponomarev, 2008).

3.4.1 Elementos Desoxidantes no Metal de Adição

A utilização de um gás de proteção levemente oxidante para a soldagem de aços torna necessário o uso de elementos desoxidantes no metal de adição como, por exemplo, o manganês (Mn) e o silício (Si). Para um resultado satisfatório na soldagem MIG-MAG de aços carbonos, é de fundamental importância o uso adequado de teores de Mn e Si. Estes elementos têm a função de desoxidar a poça de fusão, pois em contato com o O_2 formam óxidos que se alojam na superfície do cordão de solda que são posteriormente removidos. O PO do gás de proteção deve ser apropriado, pois, se for baixo, não acontecerá a formação de óxidos superficiais e o excesso destes elementos de liga formará solução sólida substitucional, endurecendo o metal de solda. Portanto, a seleção do metal de adição deve ser considerada juntamente com o gás de proteção. Uma solda com pouca ou nenhuma escória pode sugerir um arame com baixo teor desoxidante e um gás com baixo PO,

ou um arame com baixo teor de desoxidante e um gás com alto PO pode gerar porosidade e propriedades mecânicas indesejáveis na solda.

3.4.2 Consequências do Excesso de Oxigênio no Gás de Proteção

De acordo com a teoria do modelo oxidante, há a necessidade da presença de algum elemento oxidante para obter a estabilidade do arco elétrico, em compensação, o excesso de oxigênio é prejudicial à soldagem. De fato, o oxigênio tem elevada solubilidade no ferro líquido e muito baixa solubilidade no ferro sólido. Embora haja uma variação considerável da taxa de formação de óxido para diferentes metais, uma fina camada de óxido pode impedir a soldagem de peças e outros problemas podem surgir como (Linnert, 1994):

- As gotas fundidas a partir do metal de adição podem se oxidar durante a transferência para a poça de fusão e não ocorrer a interação atômica com o metal de solda;

- Os óxidos formados podem se dissolver no metal fundido, acarretando a fragilização da solda no estado sólido;

- As propriedades mecânicas podem diminuir significativamente devido à quantidade de óxidos aprisionados na solda.

- A adição de O_2 na mistura gasosa de proteção provoca a perda de elementos químicos devido à oxidação que é intensificada quando há maior teor deste gás na mistura.

Misturas gasosas com elevado teor de O_2 reduzem a tenacidade ao impacto das soldas produzidas devido à formação de inclusões no metal de solda que agem como concentradores de tensão e de propagação de trincas. Entretanto quando se aumenta o teor de oxigênio na solda, sua resistência é aumentada. Baixos teores de CO_2 e O_2 no gás de proteção produzem quantidades aceitáveis de inclusões de óxidos, tornando a microestrutura mais refinada e favorecendo uma melhor resistência ao impacto (Dalpiaz e Machado, 1999). O oxigênio dissolvido na poça de fusão, além de causar inclusões de óxidos, também reage com o carbono presente no aço, desde que a quantidade deste gás seja suficiente. Nesta reação com o carbono, há a produção dos gases CO ou CO_2 que provocam porosidades na solda produzida e influenciam na redução da qualidade das propriedades mecânicas do cordão (Moreira, 2008).

3.4.3 Inclusões no Metal de Solda

A formação das inclusões no metal de solda durante a solidificação do metal fundido é devido ao excesso de oxigênio que é rejeitado da solução e associa-se manganês, silício, alumínio, entre outros elementos, presentes no metal de base e no metal de adição em forma de inclusões. A quantidade de inclusões é afetada essencialmente pela composição química da poça de fusão por causa do oxigênio em solução no metal fundido (Tatagiba et al., 2012).

As variáveis do processo de soldagem podem alterar as propriedades mecânicas, bem como fornecer elementos indesejáveis à solda como hidrogênio, nitrogênio, etc. O gás de proteção também tem a sua participação na formação de inclusões e, conseqüentemente, influência nas propriedades mecânicas do metal de solda.

As propriedades mecânicas do metal de solda estão relacionadas também a sua microestrutura. É observado que uma melhora na resistência mecânica e tenacidade do cordão de solda estão relacionadas com a presença de ferrita acicular na microestrutura. A formação desta fase ocorre também na poça de fusão devido à dispersão de inclusões não metálicas, cuja morfologia e composição química destas partículas são bastante variáveis (Abson, 1989; Babu, 2004).

Gases de proteção contendo maiores teores de O_2 e CO_2 podem diminuir a tenacidade do metal de solda, pois forma inclusões de óxidos. Quando a quantidade destes gases é adequada, é verificada uma diminuição da dureza do metal de solda e inclusões com dimensões menores (Prado, 2004)

Em soldagem pelo processo MIG-MAG, a proteção gasosa é geralmente com baixos teores de dióxido de carbono e oxigênio, pois a adição deste gás intensifica a inclusão de carbono além de oxidar o metal depositado. A inclusão de carbono é desvantajosa, pois pode diminuir o teor de ferrita no metal depositado, dificulta a formação de austenita e, conseqüentemente, reduz a tenacidade da solda. (Ferraresi et al., 2012).

Na soldagem de aço inoxidável com gás inerte à base de argônio, a retenção de elementos de liga no cordão de solda é facilitada, deixando a solda isenta de inclusões além de melhorar as propriedades mecânicas (Filho e Ferraresi, 2007).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa foram:

- 1- Chapa de aço carbono SAE 1020 com 6,35 mm de espessura com dimensões de 200 X 50 mm;
- 2- Chapa de aço carbono SAE 1020 com 12,7 mm de espessura com dimensões de 100 X 100 mm;
- 3- Bobina com arame com 1,2 mm de diâmetro de classificação ER70S-6 (AWS A.5.18, 1998);
- 4- Escova rotativa, discos de corte e desbaste;
- 5- Gases de proteção H₂; Ar; CO₂ de fabricação White Martins;

4.2 Equipamentos

- 1- Máquina de solda SOLMIG 403-CV NAVY fabricação White Martins (figura 4.1);
- 2- Equipamento para mecanização da soldagem de propriedade do Laboratório de Soldagem do Centro de Tecnologia Rio da White Martins (figura 4.1);
- 3- Misturador de gás com rotômetros de propriedade do Laboratório de Soldagem do Centro de Tecnologia Rio da White Martins (figura 4.2);
- 4- Sistema de aquisição de dados SAP V4.0 do fabricante IMC Soldagem (figura 4.1);
- 5- Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAX de propriedade de SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi.
- 6- Balança de precisão com resolução de 0,1 g de propriedade da White Martins;
- 7- Microscópio Neophot-32 de propriedade da UENF;
- 8- Prensa hidráulica Termopress de propriedade da UENF;
- 9- Microdurômetro HMV-2, do fabricante Shimadzu do Brasil, de propriedade da UENF;
- 10- Coletor de respingos de propriedade da UENF (figura 4.3);
- 11- Paquímetro.



Figura 4.1 – Máquina de solda SOLMIG 403-CV NAVY; Analisador de gás Thermco, Sistema de aquisição de dados SAP; Equipamento para mecanização da soldagem

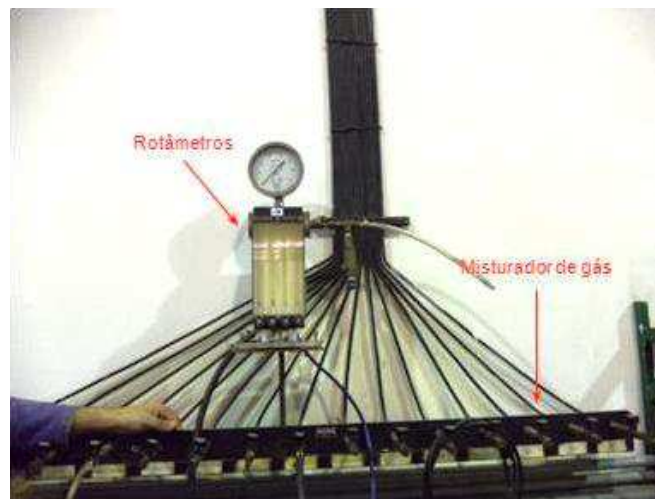


Figura 4.2 – Misturador de gás e rotâmetro



Figura 4.3 – Coletor de respingos

4.3 Metodologia

A avaliação da estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG com a utilização de gases de proteção contendo hidrogênio foi executada em três etapas.

4.3.1 Primeira etapa

O objetivo desta etapa foi verificar a possibilidade de utilização de gás redutor na soldagem do aço carbono pelo processo MIG-MAG. Os gases de proteção comerciais utilizados foram Ar e CO₂, misturados entre si e com adição de hidrogênio. As seguintes questões foram observadas nesta etapa:

- 1- Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos;
- 2- Avaliação da estabilidade do arco elétrico para os diversos gases de proteção utilizados nas soldagens;
- 3- Definição dos gases de proteção que obtiveram as soldagens mais estáveis;
- 4- Determinação dos parâmetros de soldagem tensão e corrente;

O resultado esperado é conhecer o efeito da adição de gás redutor, no caso o H₂, sobre a estabilidade da soldagem do aço carbono pelo processo MIG-MAG, bem como selecionar misturas gasosas contendo H₂ para a segunda etapa. As análises foram por comparação entre as soldas executadas com os gases comerciais e com estes gases com adições de H₂.

4.3.1.1 Gases de proteção para soldagem das chapas

Os gases de proteção utilizados nesta etapa foram misturados no misturador com rotômetros e com auxílio do programa ROTO_BR cuja margem de erro relativo, nas composições dos componentes com menores concentrações, é de no máximo 10% (Lobato e Neto, 2003; SFA-A5.32/SFA-5.32M, 2013). A figura 4.4 mostra a tela do programa ROTO_BR com os cálculos para a mistura Ar+10%CO₂+2%H₂.

88% Ar + 10% CO₂ + 2% H₂

Misturador de Gás para Soldagem - Pasta de Cálculo

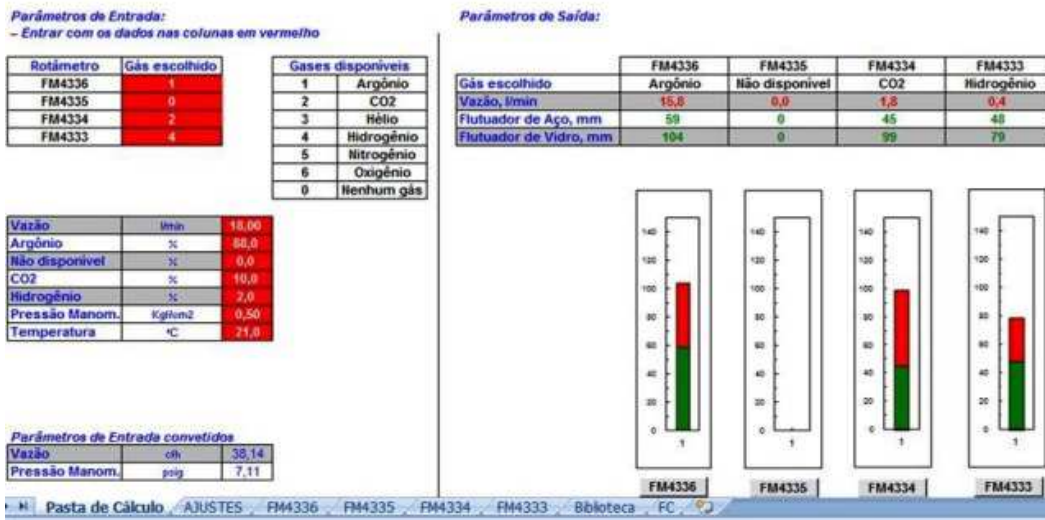


Figura 4.4 - Tela do programa ROTO_BR com os cálculos para a mistura Ar+10%CO₂+2%H₂.

As seguintes misturas com os gases Ar, CO₂ e H₂ foram escolhidas com a finalidade de se obter um intervalo significativo de teores de H₂:

- 1- Ar+2%H₂;
- 2- Ar+4%H₂;
- 3- Ar+6%H₂;
- 4- Ar+8%H₂;
- 5- Ar+10%H₂;
- 6- Ar+10%CO₂;
- 7- Ar+10%CO₂+2%H₂;
- 8- Ar+10%CO₂+4%H₂;
- 9- Ar+10%CO₂+6%H₂;
- 10- Ar+10%CO₂+8%H₂;
- 11- Ar+10%CO₂+10%H₂;
- 12- Ar+25%CO₂;
- 13- Ar+25%CO₂+2%H₂;
- 14- Ar+25%CO₂+4%H₂;
- 15- Ar+25%CO₂+6%H₂;
- 16- Ar+25%CO₂+8%H₂;
- 17- Ar+25%CO₂+10%H₂;

- 18- CO₂ puro;
- 19- CO₂+2%H₂;
- 20- CO₂+4%H₂
- 21- CO₂+6%H₂;
- 22- CO₂+8%H₂;
- 23- CO₂+10%H₂.

4.3.1.2 Soldagem das chapas

Os cordões de solda foram depositados sobre as chapas de aço carbono com 6,35 mm de espessura e dimensões de 200 X 50 mm. Foi soldado um cordão para cada chapa pelo processo de soldagem MIG-MAG mecanizado, na posição plana. O arame utilizado foi o ER 70S-6 de 1,2 mm e o modo de transferência por curto circuito. A distância do bico de contato a peça (DBCP) foi igual a 12 mm, ângulo da tocha de 90° em relação à face da solda, velocidade de soldagem de 300 mm/min e vazão do gás de proteção de 15 l/min. A velocidade de alimentação do arame foi regulada de acordo com a experiência do soldador para as tensões de 21,0 V e 22,0 V. Cada solda foi repetida uma vez para cada tensão e gás utilizado.

4.3.1.3 Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos através de inspeção visual e por líquido penetrante

Logo após o término de cada soldagem, foi observada visualmente a existência de descontinuidades grosseiras, quantidade de escória e respingos produzidos e aparência do cordão de solda.

Em sequência, foi realizado ensaio de visual de solda, de acordo com procedimento PR-050 (ABENDI, 2011) e por líquido penetrante pelo procedimento PR-001 (ABENDI, 2008). Para execução destes ensaios, foi executada limpeza por escovamento sobre o cordão de solda e em aproximadamente de 25 mm adjacentes às margens da solda. O Ensaio Visual de Solda foi executado com o objetivo de verificar a qualidade do acabamento do cordão de solda e a presença de descontinuidades superficiais grosseiras. O Líquido Penetrante foi utilizado para verificação de pequenas descontinuidades superficiais.

4.3.1.4 Avaliação das macrografias, Índice de convexidade (IC) e penetração

As amostras para macrografia foram obtidas por corte transversal ao cordão de solda e estas superfícies preparadas por lixamento (lixas 220, 320, 400 e 600 mesh) e a superfície posteriormente atacada com Nital 10%. As macrografias tiveram como finalidade a verificação do aspecto da seção transversal da junta soldada e verificação da existência de descontinuidades no metal de solda (MS), na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de base (MB) adjacente a ZTA. Também foi avaliado o Índice de convexidade (IC), que é a relação entre reforço (r) e largura do cordão de solda (b) (Silva *et al*, 2000), e a penetração da solda. Os valores de r , b e penetração foram medidos diretamente nas macrografias com auxílio de um paquímetro. As análises do IC e da penetração foram por intermédios de gráficos do tipo dispersão com linha de tendência linear, elaborados pelo programa excel, conforme a seguir:

1- Índice de convexidade:

- Foi utilizado o gráfico Índice de Convexidade (%) X Teor de H_2 no Gás de Proteção (%). Os valores de IC foram relativos a todos os experimentos nos dois níveis de tensão (21,0 e 22,0 V).

2- Penetração:

- Foram empregados os gráficos Penetração (mm) X Teor de H_2 no Gás de Proteção (%) e Penetração (mm) X Corrente de Soldagem (A).
- Ambos foram elaborados com os valores de penetração relativos a todos os experimentos nos dois níveis de tensão.

O critério adotado para a avaliação foi que quanto menor o valor de IC e maior penetração melhor o formato do cordão de solda.

4.1.3.5 Análise da estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos

O objetivo desta avaliação é verificar a repetibilidade dos parâmetros de tensão e corrente na soldagem MIG-MAG por curto circuito e, por conseguinte, a estabilidade do arco elétrico.

Para a obtenção dos dados foi utilizado o sistema de aquisição de dados SAP V4.0 do fabricante IMC Soldagem. Os dados foram adquiridos a cada 0,2 s e o período total de aquisição para cada solda foi de 20,0 s, com a contagem

iniciada aproximadamente após 5,0 s do início da soldagem. Foram utilizados os seguintes índices de estabilidade:

- 1- Desvio padrão de picos de corrente (DPPC);
- 2- Desvio padrão do período de arco aberto (DPAA);
- 3- Desvio padrão do período de curto circuito (DPCC).
- 4- Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc).

O tratamento dos dados coletados foi por comparação direta dos valores adquiridos no SAP 4.0, para cada solda, através de gráficos no excel do mesmo tipo utilizado no item 4.3.1.4. O critério empregado na análise foi o de quanto menor o índice avaliado melhor a estabilidade do arco elétrico. Foram feitas duas análises para cada índice proposto:

- Pelos gráficos DPPC (A) x Teor de H₂ (%), DPAA (ms) x Teor de H₂ (%), DPCC (ms) x Teor de H₂ (%), IVcc x Teor de H₂ (%), para os 4 gases de proteção convencionais e para os 2 valores de tensão usados.
- Pelos mesmos gráficos anteriores, porém para cada tensão de soldagem.

Com base nos resultados dos ensaios acima, foram escolhidos misturas de gases contendo H₂ que obtiveram melhor comportamento, para o prosseguimento da pesquisa na etapa a seguir.

4.3.2 Segunda etapa

Nesta etapa da pesquisa foram analisadas as soldas com os gases Ar+25%CO₂; CO₂ puro; Ar+25%CO₂+2%H₂ e CO₂+4%H₂ que tiveram os melhores resultados de estabilidade na primeira etapa.

As soldas foram executadas com os mesmos materiais, equipamentos e procedimento utilizado na etapa anterior. Para verificação da estabilidade, foi utilizada a mesma metodologia da primeira etapa com os seguintes detalhes:

- Foi acrescentada a avaliação da quantidade de respingos produzidos nas soldas;
- Execução de soldas com os gases propostos nas tensões de 18,0 V, 19,0 V e 20,0 V.
- Excluída a análise pelo Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc).

Com exceção da avaliação de respingos, foram também utilizados os resultados encontrados na primeira etapa (tensões de 21,0 V e 22,0 V), para as

análises propostas. A finalidade destes ensaios foi comprovar por comparação com os gases convencionais Ar+25%CO₂ e CO₂, os efeitos da adição de H₂ na estabilidade do processo de soldagem.

4.3.2.1 Avaliação da quantidade de respingos produzidos nas soldas

Os respingos produzidos e coletados no coletor de respingos (figura 4.3) foram pesados e o resultado dividido pelo tempo de soldagem. O peso dos respingos e o tempo de soldagem, utilizado para o cálculo, corresponderam à soma destes parâmetros para os dois experimentos executados para cada tensão (18,0 V, 19,0 V e 20,0 V). Isto foi necessário para que a quantidade de respingos fosse suficiente para se pesar na balança com resolução de uma casa decimal. Após cálculos foram avaliados comparativamente os respingos gerados nas soldas com os gases comerciais e com adição de H₂, por intermédio do gráfico Produção de Respingos (g/min) x Tensão de Soldagem (V) elaborados no programa Excel.

4.3.3 Terceira etapa

O objetivo desta etapa é avaliar se os gases com adição de H₂, utilizados na segunda etapa, não comprometeu o metal de solda no que diz respeito à composição química, microestrutura e dureza.

4.3.3.1 Análise química do metal de solda

Para retirada da amostra para análise química, foram executadas soldas com os gases Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂+2%H₂, e CO₂+4%H₂, em chapas de aço carbono SAE 1020 com 12,7 mm de espessura com dimensões de 100 X 100 mm. A faixa de tensão e corrente foi de 18 a 22 V e 150 a 200 A. A soldagem foi por deposição de camadas sobre a chapa (almofada) com o arame ER70S-6 de 1,2 mm, seguindo os critérios da norma ASME SFA-5.18 / SFA-5.18M - Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding de 2007. A figura 4.7 mostra os detalhes da preparação da almofada soldada para retirada da amostra para análise química.

A análise química foi executada por método analítico pelo Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx de propriedade de SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi. Foram feitas comparações entre as análises químicas das

soldas com os 04 gases utilizados com a composição química do arame ER70S-6, vide tabela 4.1.

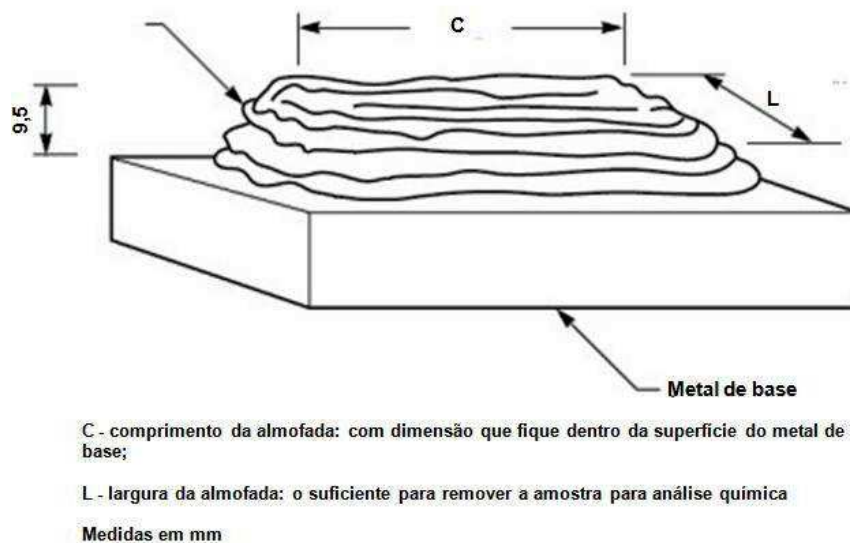


Figura 4.5 – Almofada para análise química do metal de solda (ASME SFA-5.18 / SFA-5.18M, 2007)

Tabela 4.1 – Requerimentos de análise química para arame ER70S-6 (% em peso)¹

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Zr	Al
0,06	1,40	0,80										
a	a	a	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	0.03	0.50	-	-	-
015	1,85	1,15										

1- Valores únicos são máximos

4.3.3.2 Microscopia Ótica

Esta análise teve por finalidade a identificação qualitativa e quantitativa dos microconstituintes presentes no metal de solda. A preparação metalográfica da amostra consistiu em:

1- Embutimento a quente: a amostra foi envolvida com resina baquelítica de polimerização a quente e aplicada uma pressão para compactar a resina. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica Termopress.

2- Lixamento: foi utilizado, sucessivamente, 5 lixas de granulometria de 220mesh, 320mesh, 400mesh, 600mesh e 1200mesh, respectivamente, sendo que em cada troca da lixa foi mudado a direção de lixamento em 90º até o completo desaparecimento dos riscos da lixa anterior.

3- Polimento semi-automatizado foi realizado em pano impregnado com pasta de alumina com granulometria de $1\mu\text{m}$ e posteriormente com $0,1\mu\text{m}$.

4- Ataque químico foi realizado com solução de Nital 2% (2% em volume de ácido nítrico numa solução com álcool etílico), por um período de aproximadamente 5s.

A observação da microestrutura e fotografia foi realizada no Microscópio Neophot-32. A identificação e quantificação dos microconstituintes presentes no metal de solda, foi segundo o trabalho técnico da Associação Brasileira de Soldagem (ABS). Esta instrução diz respeito somente aos constituintes principais da microestrutura. A contagem de micro fases e inclusões devem ser analisadas com aumentos maiores (Perdigão, 1987). A nomenclatura dos constituintes principais é mostrada na tabela 4.2. A análise quantitativa dos microconstituintes foi executada em mil pontos sobre a foto da micrografia da zona fundida com aumento de 200x e posterior contagem do microconstituente em cada ponto.

Tabela 4.2– Microestruturas principais do metal de solda

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

4.3.3.3 Microdureza Vickers

A microdureza Vickers foi obtida com um Microdurômetro modelo HMV-2, do fabricante Shimadzu do Brasil, na mesma amostra utilizada na microscopia ótica. Foi utilizada uma carga de 50 g para impressão em 15 pontos aleatórios na região da amostra. A finalidade deste ensaio foi a verificação de diferenças significativas entre as durezas do metal de solda produzidos com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, $\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Primeira etapa

O objetivo desta etapa foi verificar se é possível a utilização de gás redutor na soldagem do aço carbono pelo processo MIG-MAG. O gás redutor escolhido foi o hidrogênio, por se tratar de um gás com facilidade de se encontrar no mercado e por já ser utilizado em soldagem.

Para se atingir o objetivo proposto, foram testados os gases Ar+2% a 10% H_2 (o gás comercial Ar puro não foi utilizado), e os gases comerciais Ar+10% CO_2 , Ar+25% CO_2 , CO_2 e cada um deles com adições de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de H_2 . Nas soldas produzidas foi efetuada uma análise qualitativa por inspeção visual e por líquido penetrante, avaliação da seção transversal do cordão de solda (largura, reforço e penetração) e estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos.

O resultado esperado é conhecer o efeito da adição de gás redutor H_2 sobre a estabilidade do processo na soldagem MIG-MAG do aço carbono, bem como selecionar misturas gasosas contendo H_2 para a segunda etapa. Esta proposta leva em conta que a estabilidade do processo de soldagem é apropriada quando o aspecto visual, e o perfil do cordão de solda sejam adequados, e o arco elétrico seja estável.

Vale ressaltar que as tensões de soldagem de 21,0 V e 22,0 V foram selecionadas pela metodologia proposta no capítulo 4 e a velocidade de alimentação do arame (corrente) foi regulada conforme experiência do soldador.

As tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 mostram os valores de corrente, tensão e tempo de soldagem para as soldas realizadas. Para os 92 experimentos previstos, 69 foram efetivados sendo aqui reportados. As restantes 23 soldas não foram aqui reportadas devido à ocorrência repetitiva de porosidade excessiva, devido ao excesso de H_2 na mistura gasosa, e por não ter se conseguido a regulagem de corrente e tensão prevista na metodologia utilizada (capítulo 4 – Materiais e métodos).

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem com Ar com adição de 2 a 10% H_2 .

Gás de proteção	Identificação da Chapa	Tensão regulada na máquina (V)	Tensão média registrada no SAP (V)	Corrente regulada na máquina (A)	Corrente média registrada no SAP (A)	Tempo de soldagem (s)
Ar+2% H_2	50	21,0	21,7	182,0	187,0	40,00
	53		21,6	180,0	182,0	36,21
	51	22,0	22,8	216,0	213,1	31,02
	54		22,7	215,0	212,5	30,58
Ar+4% H_2	56	21,0	21,1	178,0	176,3	36,11
	58		21,6	180,0	179,3	41,78
	4.1	22,0	20,5	201,0	210,0	32,58
	59		23,0	215,0	215,2	30,48
Ar+6% H_2	61	21,0	21,1	180,0	177,6	36,43
	64		21,5	185,0	184,7	36,16
	62	22,0	23,0	216,0	216,0	31,19
	65		22,7	217,0	215,2	27,48
Ar+8% H_2	67	21,0	21,0	180,0	173,9	39,75
	70		21,6	178,0	179,3	36,09
	68	22,0	22,3	215,0	207,4	26,86
	71		23,2	211,0	215,7	38,54
Ar+10% H_2	73	21,0	21,2	180,0	177,0	33,70
	76		21,6	176,0	177,5	36,03
	74	22,0	23,5	215,0	214,7	37,69
	77		Não foi soldado			

Tabela 5.2 - Parâmetros de soldagem com Ar+10%CO₂ e Ar+10%CO₂+2% a 10%H₂.

Gás de proteção	Identificação da Chapa	Tensão regulada na máquina (V)	Tensão média registrada no SAP (V)	Corrente regulada na máquina (A)	Corrente média registrada no SAP (A)	Tempo de soldagem (s)
Ar+10%CO ₂	1.2	21,0	21,0	202,0	198,9	36,36
	1.4		20,4	200,0	195,7	34,56
	1	22,0	22,0	244,0	249,0	29,48
	5.1		22,0	242,0	238,5	30,21
Ar+10%CO ₂ +2%H ₂	4.6	21,0	21,0	190,0	190,0	32,22
	4.3		21,2	190,0	189,3	36,10
	4	22,0	23,0	242,0	247,5	28,79
	4.4		21,5	235,0	231,8	29,79
Ar+10%CO ₂ +4%H ₂	5.2	21,0	21,2	190,0	188,7	36,03
	5.4		21,1	190,0	188,7	36,06
	5	22,0	22,1	240,0	239,9	31,78
	5.5		22,0	235,0	234,6	31,22
Ar+10%CO ₂ +6%H ₂	6.2	21,0	21,0	190,0	190,0	34,33
	6.4		21,2	192,0	190,6	36,22
	6	22,0	22,7	245,0	250,8	30,96
	6.5		21,7	230,0	226,7	30,71
Ar+10%CO ₂ +8%H ₂	14	21,0	21,2	187,0	189,9	36,31
	17		Não foi soldado			
	15	22,0	21,9	230,0	223,1	30,36
	18		21,8	235,0	224,7	30,31
Ar+10%CO ₂ +10%H ₂	20	21,0	Não foi soldado			
	23		Não foi soldado			
	21	22,0	Não foi soldado			
	24		Não foi soldado			

Tabela 5.3 - Parâmetros de soldagem com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2% a 10%H₂.

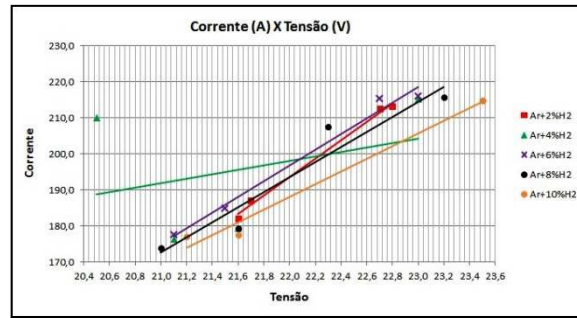
Gás de proteção	Identificação da Chapa	Tensão regulada na máquina (V)	Tensão média registrada no SAP (V)	Corrente regulada na máquina (A)	Corrente média registrada no SAP (A)	Tempo de soldagem (s)
Ar+25%CO ₂	2.2	21,0	21,0	200,0	199,1	36,42
	2.4		21,0	202,0	199,2	35,90
	2	22,0	23,1	212,0	248,9	29,82
	6.1		22,2	218,0	211,3	30,39
Ar+25%CO ₂ +2%H ₂	7.2	21,0	21,2	196,0	199,3	34,00
	7.4		20,6	196,0	189,3	36,01
	7	22,0	22,7	233,0	245,9	30,89
	7.5		21,5	235,0	228,9	30,88
Ar+25%CO ₂ +4%H ₂	8.1	21,0	21,0	196,0	193,8	35,95
	8.3		Não foi soldado			
	8	22,0	21,7	232,0	226,8	30,71
	8.4		23,1	226,0	219,5	30,63
Ar+25%CO ₂ +6%H ₂	9.1	21,0	21,0	198,0	194,6	36,19
	9.3		Não foi soldado			
	9	22,0	22,3	240,0	243,0	31,14
	9.4		21,8	230,0	227,8	29,80
Ar+25%CO ₂ +8%H ₂	26	21,0	Não foi soldado			
	29		Não foi soldado			
	27	22,0	22,0	235,0	236,9	29,58
	30		Não foi soldado			
Ar+25%CO ₂ +10%H ₂	32	21,0	Não foi soldado			
	35		Não foi soldado			
	33	22,0	21,4	238,0	229,5	31,35
	36		Não foi soldado			

Tabela 5.4 - Parâmetros de soldagem com CO₂ e CO₂+2% a 10%H₂.

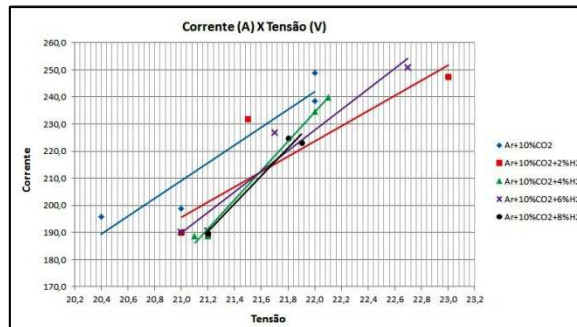
Gás de proteção	Identificação da Chapa	Tensão regulada na máquina (V)	Tensão média registrada no SAP (V)	Corrente regulada na máquina (A)	Corrente média registrada no SAP (A)	Tempo de soldagem (s)
CO ₂	3.1	21,0	22,6	167,0	170,6	39,30
	3.4	22,0	22,7	230,0	218,8	29,34
CO ₂ +2%H ₂	10.3	21,0	21,1	196,0	196,8	36,35
	10.1	22,0	22,6	230,0	228,8	31,08
	10.4		22,2	225,0	223,2	28,90
CO ₂ +4%H ₂	11	21,0	21,1	200,0	198,7	36,38
	11.3		21,0	201,0	197,4	36,17
	11.1	22,0	22,9	228,0	229,9	30,40
	11.4		22,7	233,0	231,1	29,38
CO ₂ +6%H ₂	13	21,0	23,1	167,0	169,1	40,29
	13.2		21,1	200,0	195,5	35,89
	12	22,0	22,6	230,0	246,5	31,87
	12A		22,9	237,0	242,4	29,66
CO ₂ +8%H ₂	38	21,0	21,1	200,0	196,4	35,95
	41		Não foi soldado			
	39	22,0	22,1	228,0	226,2	29,81
	42		Não foi soldado			
CO ₂ +10%H ₂	44	21,0	Não foi soldado			
	47		Não foi soldado			
	45	22,0	Não foi soldado			
	48		Não foi soldado			

5.1.1 Avaliação do comportamento da tensão e corrente na soldagem com os gases de proteção propostos

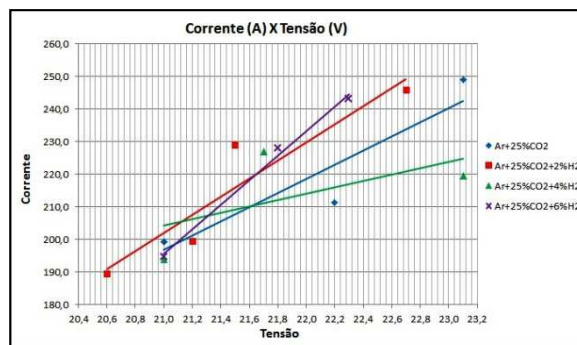
A figura 5.1 mostra os gráficos Corrente X Tensão com os dados das tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4. Pode-se observar que para todos os gases utilizados houve uma forte tendência ao aumento da corrente de soldagem com o aumento da tensão. Esta variação diretamente proporcional da corrente com a tensão se deve ao fato que o soldador percebeu a necessidade de aumentar velocidade do arame, e conseqüentemente a corrente, com o aumento da tensão. Para soldagem MIG-MAG com os gases comumente utilizados, há uma relação direta entre tensão e corrente (Fortes, 2005), de modo que a estabilidade da soldagem seja mantida. Assim sendo, para todas as avaliações previstas nesta etapa, toda vez que for citado aumento de tensão está implícito também o aumento da corrente.



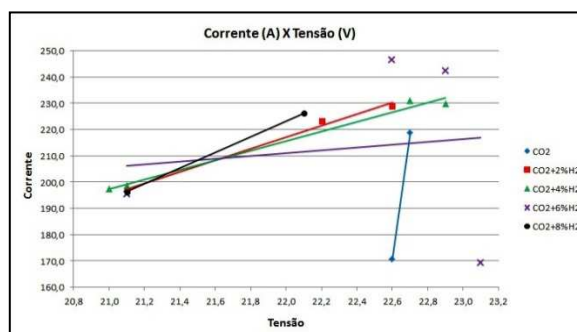
a) Misturas Ar+2% a 10% H_2



b) Mistura Ar+10% CO_2 e Ar+10% CO_2 +2% a 8% H_2



c) Mistura Ar+25% CO_2 e Ar+25% CO_2 +2% a 10% H_2



d) CO_2 e CO_2 +2% a 8% H_2

Figura 5.1 – Gráficos Corrente (A) X Tensão (V) das soldas com os gases de proteção propostos.

5.1.2 Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos através de inspeção visual e por líquido penetrante

De uma forma geral, a adição de 8 e 10% H_2 não produziram resultados satisfatórios, pois apresentaram porosidade superficial excessiva ao longo dos cordões de solda. Para a adição de 2 a 6% H_2 nos gases comerciais Ar+10% CO_2 e Ar+25% CO_2 , algumas soldas apresentaram poros isolados que foi atribuído como falha no misturador de gás. A figura 5.2 apresenta alguns cordões com porosidade cujo aspecto foi característico para todas as soldas com gases contendo 8 e 10% de H_2 .

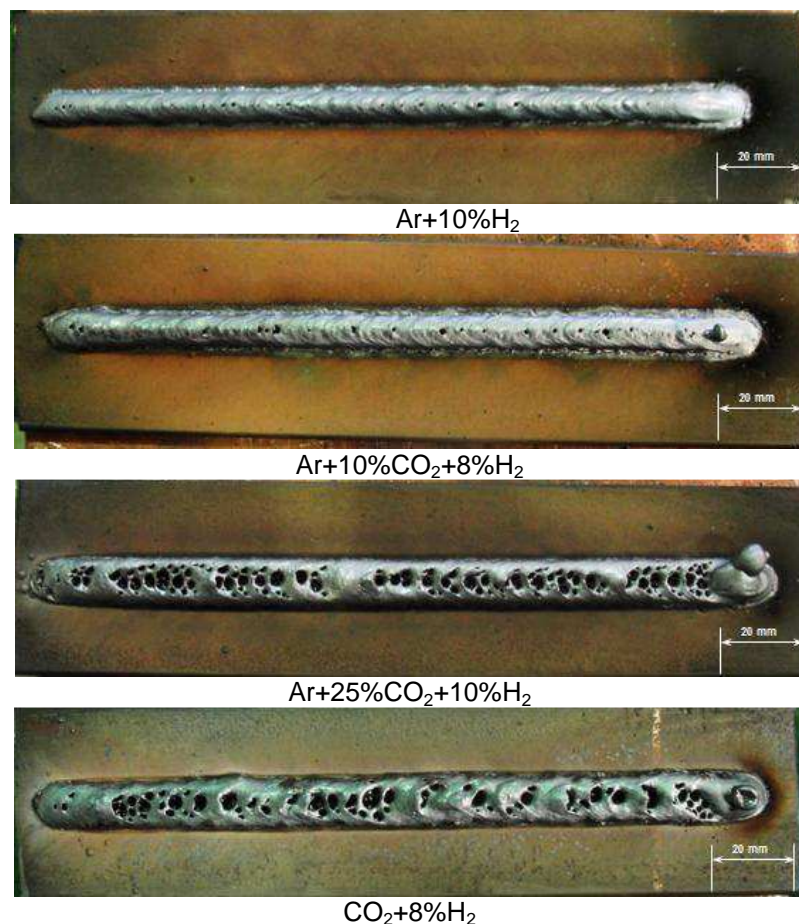


Figura 5.2 - Porosidade produzida nas soldas com gases contendo 8 e 10% de H_2 .

As figuras 5.3 a 5.18 mostram os cordões de solda com os gases de proteção e parâmetros de soldagem conforme tabelas 5.1 a 5.4, nas seguintes condições: após soldagem, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante. Devido a grande quantidade de experimentos os

ensaios por líquido penetrante foram executados por amostragem. Os resultados encontrados foram:

1- Soldas com os gases convencionais (sem adição de H₂) Ar+10%CO₂, Ar+25%CO₂ e CO₂ puro, figuras 5.7, 5.11 e 5.15

- As soldas com Ar+10%CO₂ e Ar+25%CO₂ apresentaram uma superfície de coloração clara, com respingos aderidos à chapa e regiões com escória. Com CO₂ puro apresentaram características semelhantes, porém com uma quantidade maior de respingos e escórias.

- Todas as soldas foram aprovadas no exame visual e por líquido penetrante.

2- Soldas com Ar+2%H₂, Ar+4%H₂, Ar+6%H₂ e Ar+8%H₂, figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6:

- As soldas exibiram cordões com aparência clara, com poucos respingos aderidos às chapas e com escória agrupada somente no fim dos cordões. O Ar puro não foi utilizado por não ser recomendado seu uso na soldagem MIG-MAG do aço carbono.

- Todas as soldas foram aprovadas no exame visual e por líquido penetrante.

- A mistura Ar+10%H₂ não foi aqui mostrada por apresentar porosidade excessiva

3- Soldas com Ar+10%CO₂+2%H₂, Ar+10%CO₂+4%H₂ e Ar+10%CO₂+6%H₂, figuras 5.8, 5.9 e 5.10:

- Todas as soldas apresentaram superfícies claras, respingos aderidos às chapas e regiões de escória ao longo do cordão. O aspecto superficial foi similar às soldas com o gás convencional Ar+10%CO₂.

- A chapa 4.4, soldada com Ar+10%CO₂+2%H₂ apresentou uma região com porosidade no início do cordão. As soldas com Ar+10%CO₂+6%H₂ (tensão de 21,0 V) apresentaram porosidades isoladas. Estas discontinuidades foram atribuídas a problemas no misturador de gás.

- As soldas com Ar+10%CO₂+2%H₂, Ar+10%CO₂+4%H₂ e Ar+10%CO₂+6%H₂ não apresentaram poros e foram aprovadas no exame visual e por líquido penetrante. A solda da chapa 4.4 (Ar+10%CO₂+2%H₂) foi inspecionada somente a região que não apresentou poros.

4- Soldas com Ar+25%CO₂+2%H₂, Ar+25%CO₂+4%H₂ e Ar+25%CO₂+6%H₂, figuras 5.12, 5.13 e 5.14:

- Todas as soldas apresentaram superfícies claras, respingos aderidos às chapas e algumas regiões de escória ao longo do cordão. Em comparação às soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, as mesmas características superficiais foram observadas.

- As soldas com o gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ com 2% (21,0 V), 4% e 6% H_2 apresentaram poros isolados no cordão, com exceção da solda com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$ na chapa 9. Esta descontinuidade foi atribuída à falha do misturador de gás.

- As soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$ que não apresentaram poros e foram aprovadas nos ensaios de visual de solda e líquido penetrante.

5- Soldas com $\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ e $\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$, figuras 5.16, 5.17 e 5.18:

- Todas as soldas apresentaram cordões de solda com coloração clara, algumas regiões com escória e com respingos aderidos às chapas. O aspecto visual foi semelhante das soldas com CO_2 puro.

- As soldas com $\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ e $\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$ não apresentaram poros e foram aprovadas nos ensaios de visual de solda e por líquido penetrante.

Os resultados acima indicam que a soldagem MIG-MAG de aço carbono com gases de proteção com teor igual ou superior a 8% H_2 não é recomendável devido ao excesso de porosidade. Já a adição de H_2 entre 2 e 6% mostrou não alterar o aspecto e formato do cordão, bem como não produzir descontinuidades superficiais.

A soldagem de aço carbono pelo processo MIG-MAG com gás de proteção com adição de H_2 , pode produzir um cordão de solda com aspecto superficial mais brilhante devido à limpeza dos óxidos, mas por outro lado poderia dificultar a emissão catódica entre a peça e arame consumível (Scotti e Ponomarev, 2008). O hidrogênio é adicionado em pequenos teores aos gases inertes com a finalidade de aumentar o calor adicionado à poça de fusão, normalmente é utilizado em soldas pelo processo Tungsten Inert Gas (TIG). O Argônio é um gás inerte com baixo potencial de ionização, baixo potencial de oxidação e baixa condutividade térmica. Possui alta densidade, quando comparado a outros gases, e por isso possui uma eficiência maior de proteção, pois substitui o ar com facilidade na região do arco elétrico. Soldas com Ar tem a abertura do arco facilitada, melhoria na estabilidade em correntes mais baixas e permite a transferência por spray. Produz um cordão de solda livre de

inclusões, melhorando tanto o aspecto visual quanto as propriedades mecânicas (Filho et al., 2007).

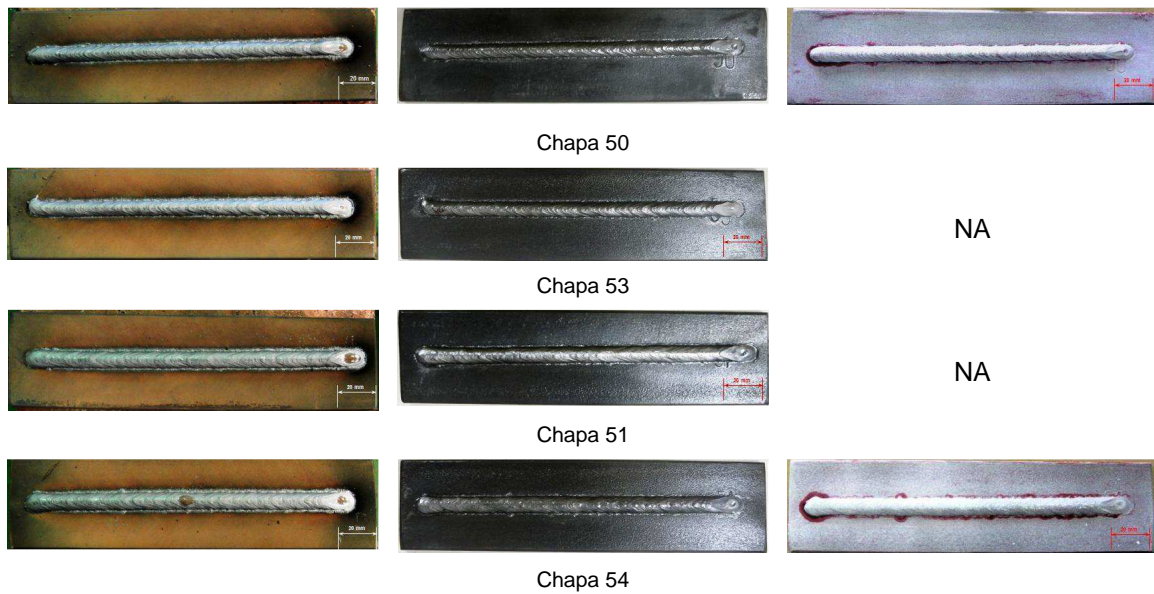


Figura 5.3 – Chapas 50, 53, 51 e 54 após soldagem com $Ar+2\%H_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

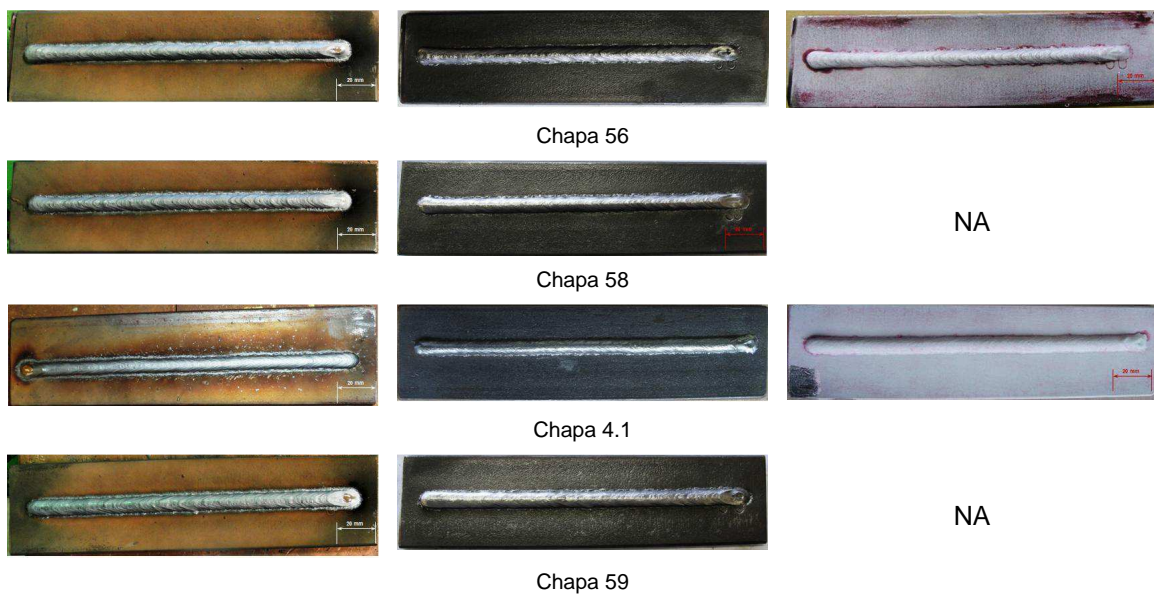


Figura 5.4 – Chapas 56, 58, 4.1 e 59 após soldagem com $Ar+4\%H_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

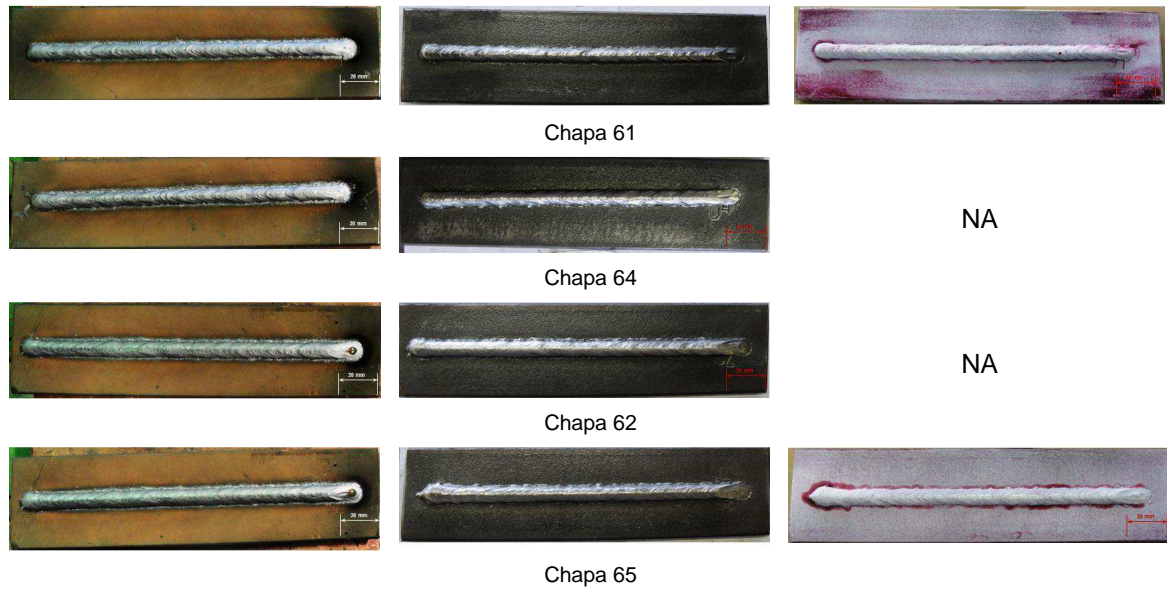


Figura 5.5 – Chapas 61, 64, 62 e 65 após soldagem com Ar+6% H_2 , após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

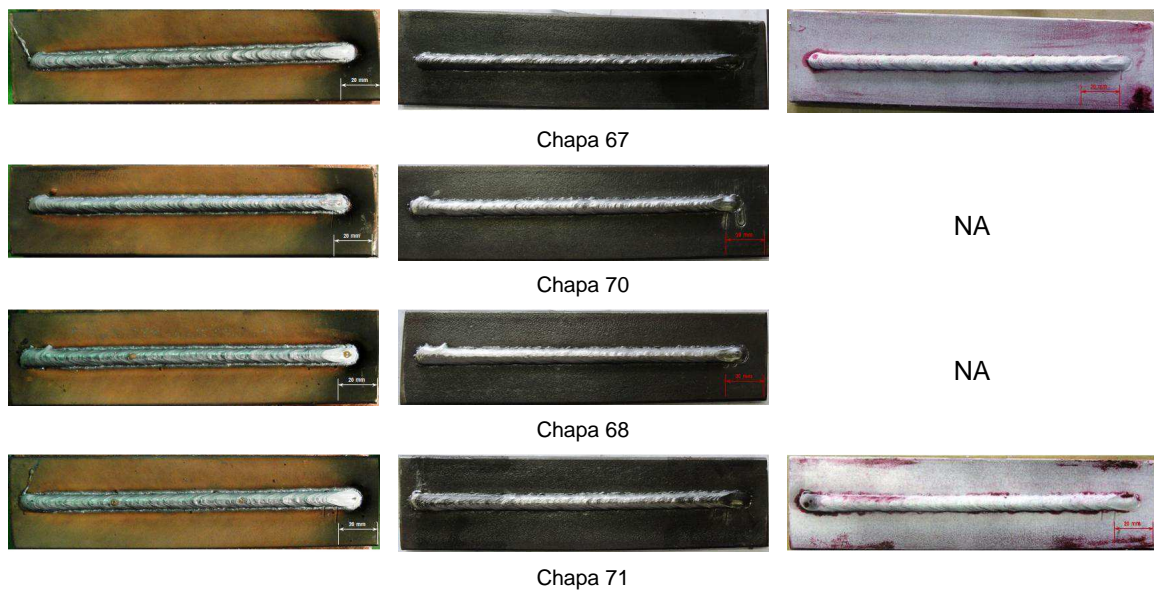


Figura 5.6 – Chapas 67, 70, 68 e 71 após soldagem com Ar+8% H_2 , após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

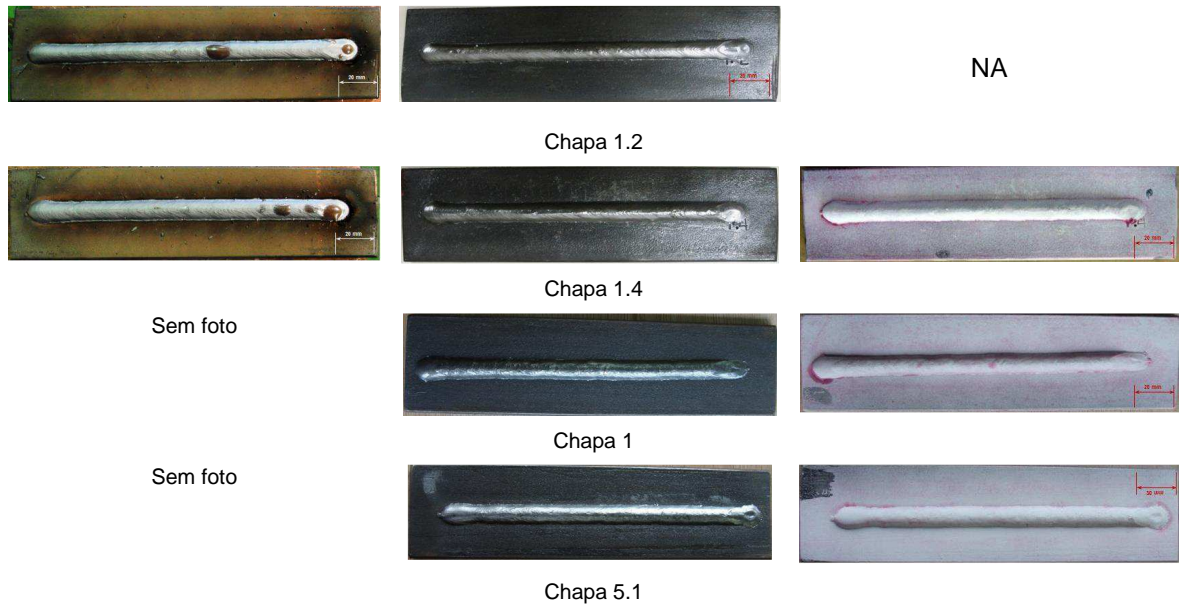


Figura 5.7 – Chapas 1.2, 1.4, 1 e 5.1 após soldagem com Ar+10%CO₂, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

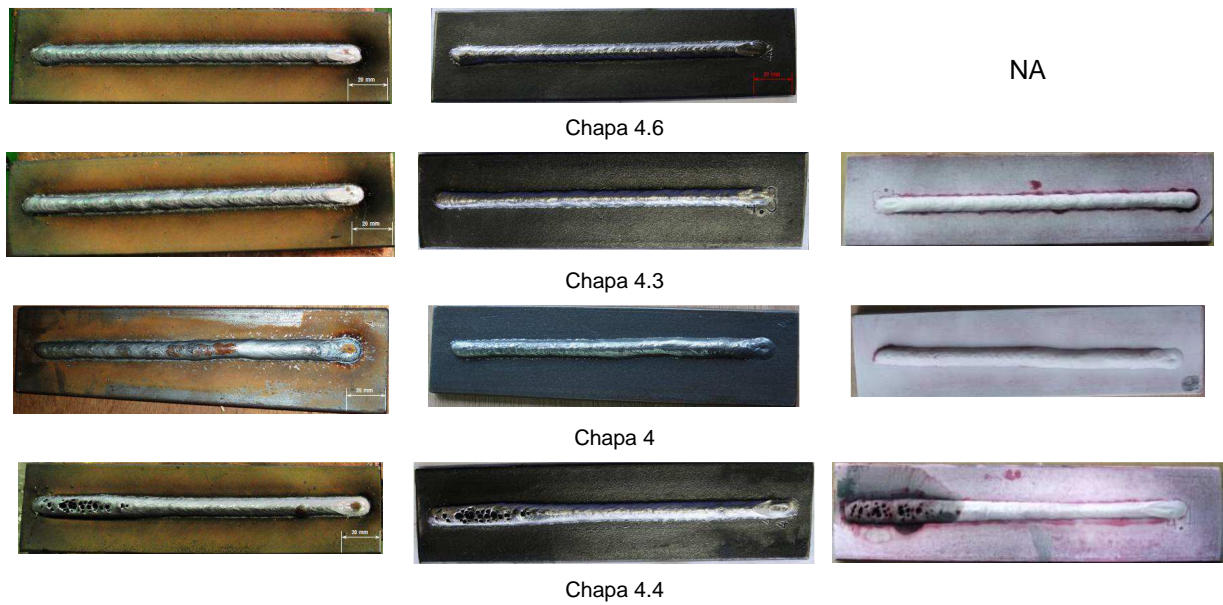


Figura 5.8 – Chapas 4.6, 4.3, 4 e 4.4 após soldagem com Ar+10%CO₂+2%H₂, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

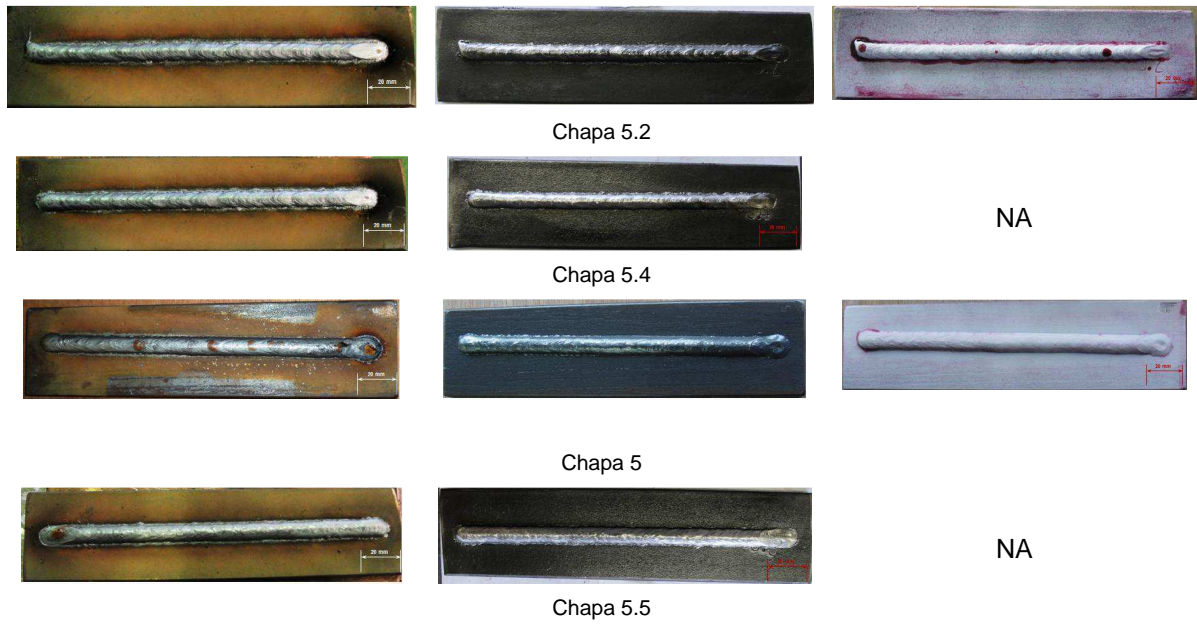


Figura 5.9 – Chapas 5.2, 5.4, 5 e 5.5 após soldagem com $Ar+10\%CO_2+4\%H_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

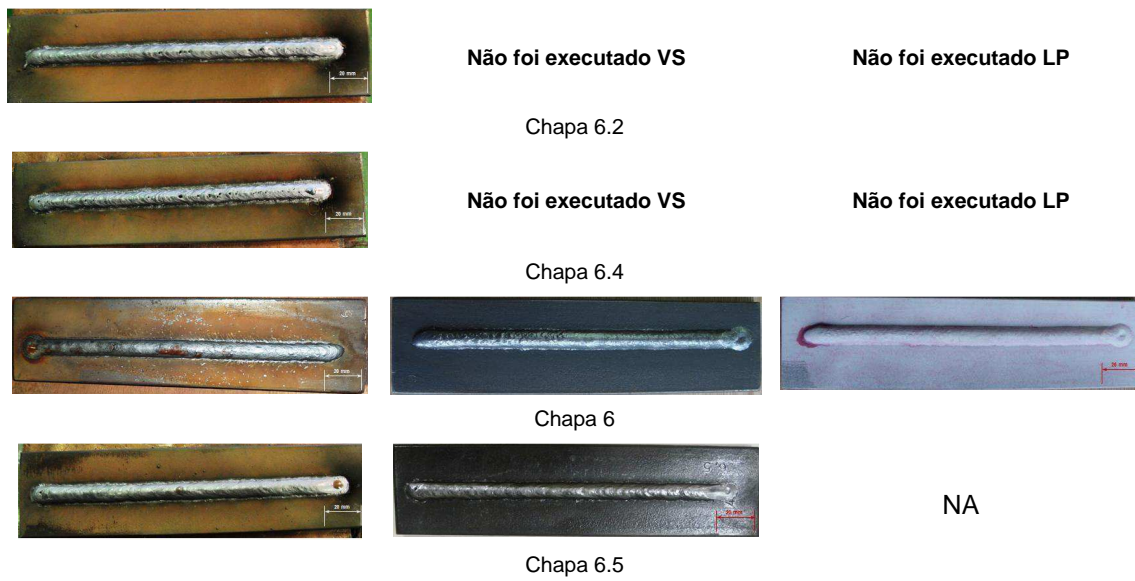


Figura 5.10 – Chapas 6.2, 6.4, 6 e 6.5 após soldagem com $Ar+10\%CO_2+6\%H_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

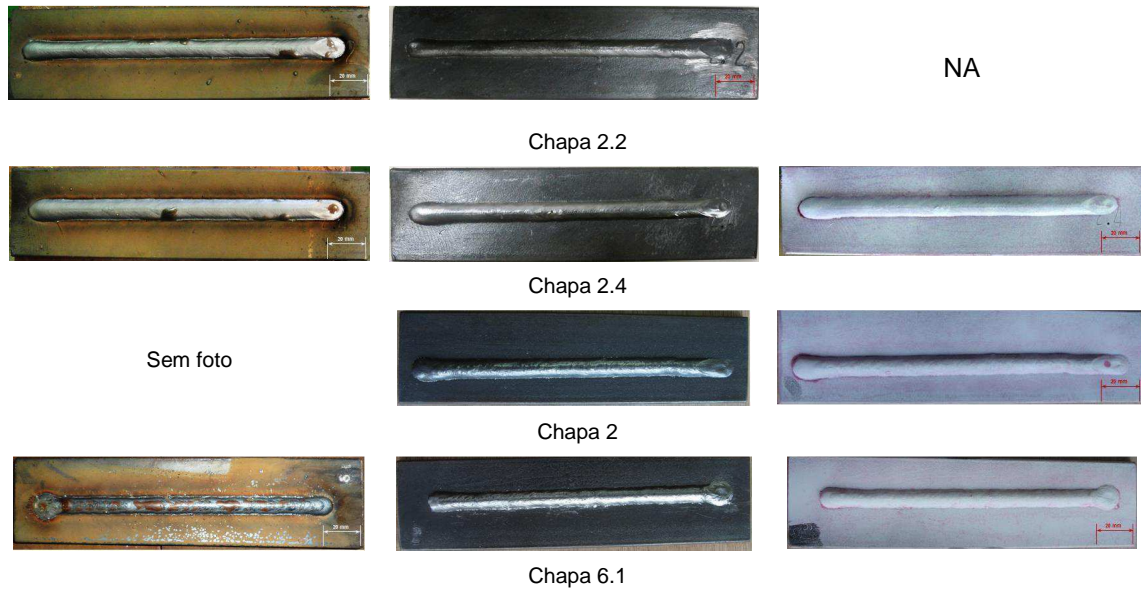


Figura 5.11 – Chapas 2.2, 2.4, 2 e 6.1 após soldagem com Ar+25%CO₂, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

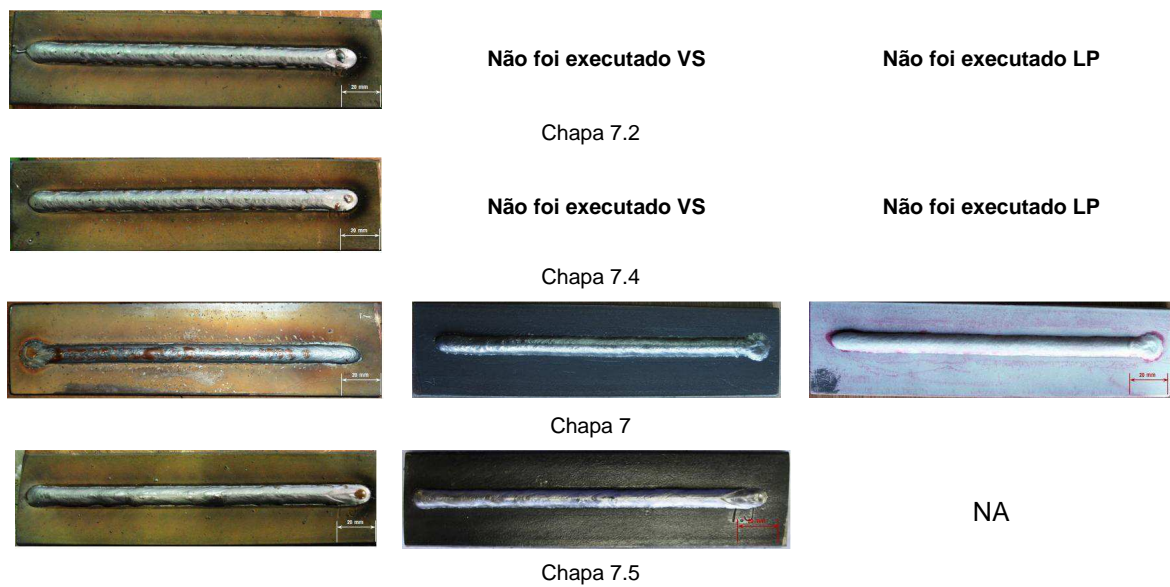


Figura 5.12 – Chapas 7.2, 7.4, 7 e 7.5 após soldagem com Ar+25%CO₂+2%H₂ após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

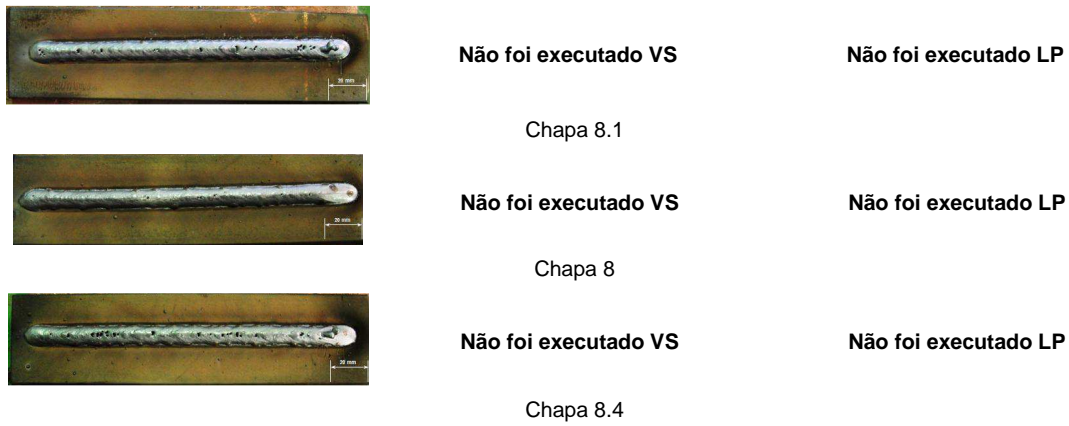


Figura 5.13 – Chapas 8.1, 8 e 8.4 após soldagem com $Ar+25\%CO_2+4\%H_2$.



Figura 5.14 – Chapas 9.1, 9 e 9.4 após soldagem com $Ar+25\%CO_2+6\%H_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

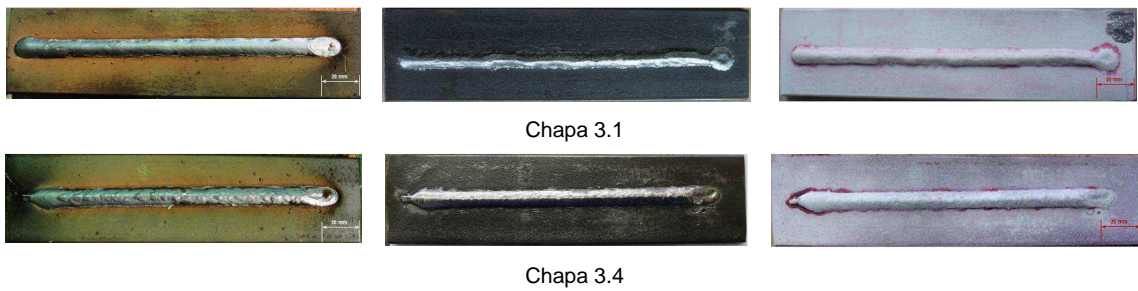


Figura 5.15 – Chapas 3.1 e 3.4 após soldagem com CO_2 , após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

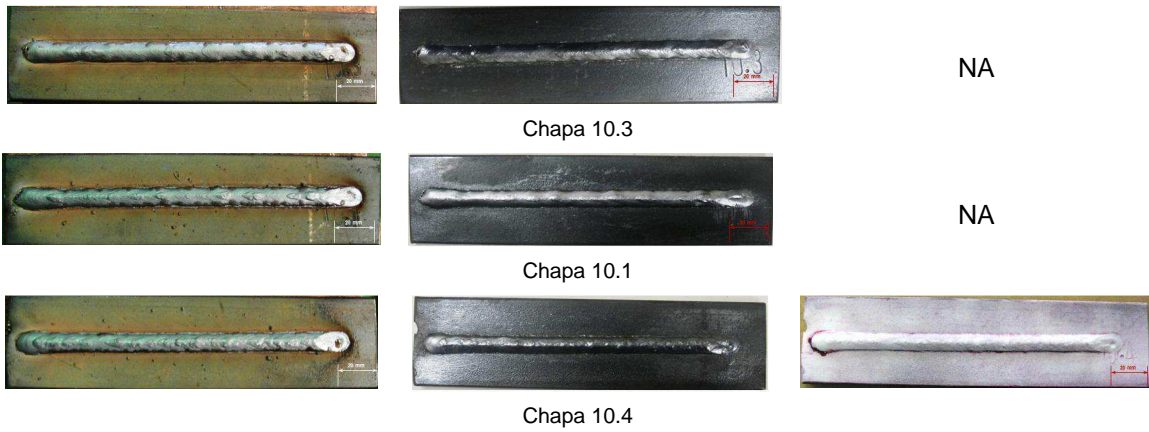


Figura 5.16 – Chapas 10.3, 10.1 e 10.4 após soldagem com $\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

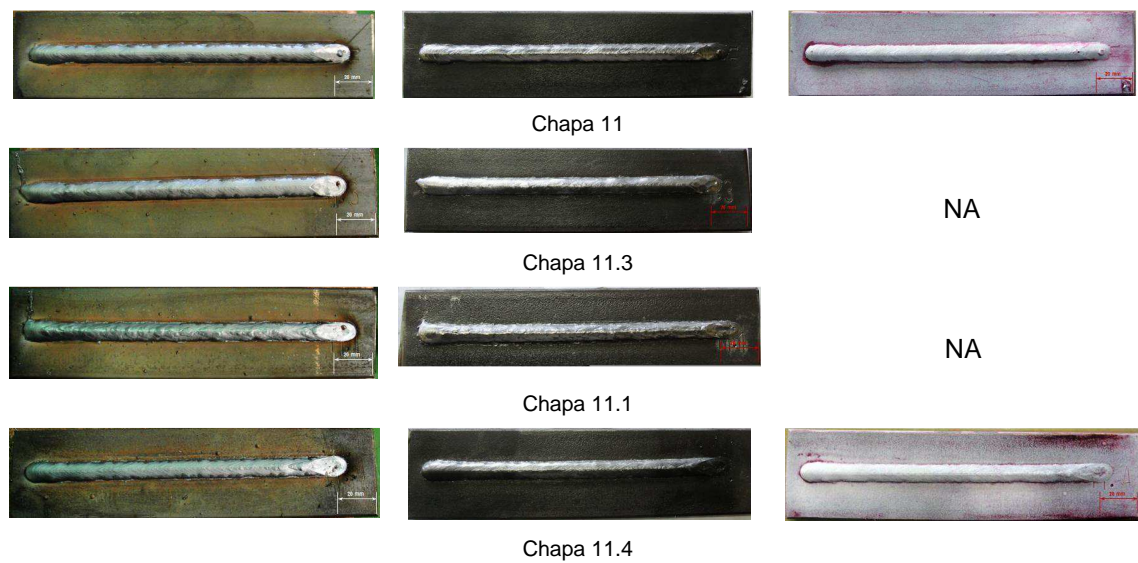


Figura 5.17 – Chapas 11, 11.3, 11.1 e 11.4 após soldagem com $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

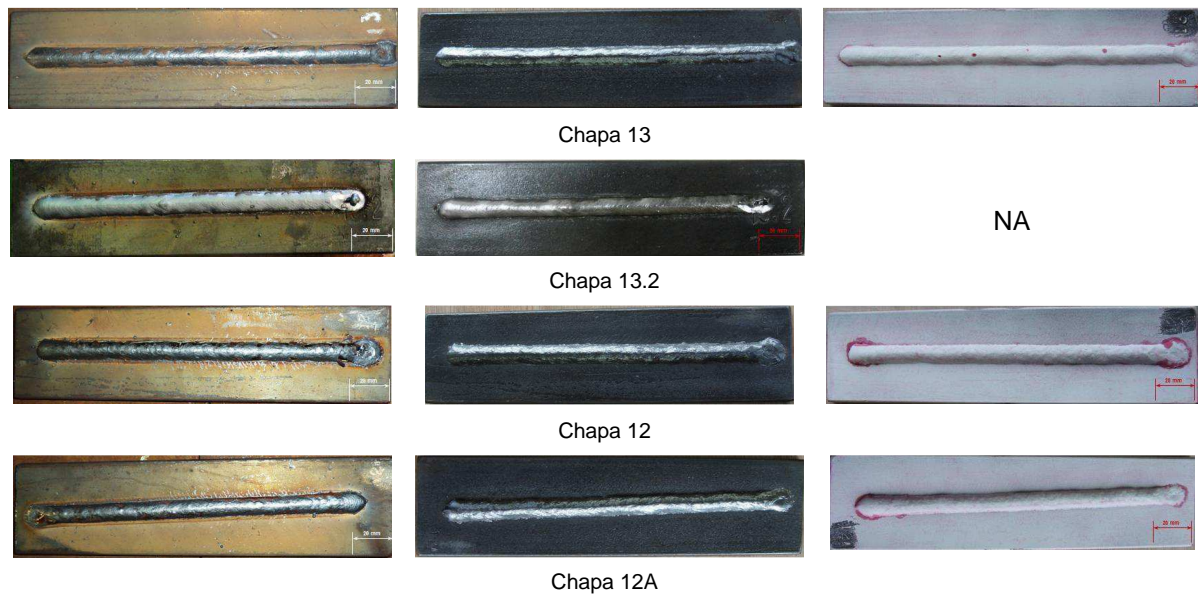


Figura 5.18 – Chapas 13, 13.2, 12 e 12A após soldagem com $\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

5.1.3 Avaliação das macrografias, Índice de convexidade (IC) e penetração

As macrografias foram avaliadas por inspeção visual, índice de convexidade (IC) e profundidade de penetração da solda. O IC foi calculado com a altura do reforço da solda e a largura do cordão, medidas diretamente nas macrografias. A penetração também foi medida nas macrografias. Para as soldas que apresentaram no ensaio visual porosidade superficial, não foram feitas macrografias. As figuras 5.19 a 5.33 mostram as macrografias das soldas com os gases de proteção utilizados. As tabelas 5.5 a 5.8 apresentam os parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e o Índice de convexidade (IC). A inspeção visual nas macrografias teve os seguintes resultados:

1- Soldas com $\text{Ar}+2\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+4\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+6\%\text{H}_2$ e $\text{Ar}+8\%\text{H}_2$, figuras 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22:

- As macrografias 61 e 64 das soldas com $\text{Ar}+6\%\text{H}_2$ e 67 e 70 com $\text{Ar}+8\%\text{H}_2$ apresentaram poros internos.

- As demais macrografias não apresentaram descontinuidades.

2- Soldas com $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2$, $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ e $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$, figuras 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26:

- A macrografia 6.5 da solda com $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$ apresentou poros internos.

- As demais macrografias não apresentaram descontinuidades.

3- Soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$, figuras 5.27, 5.28 e 5.29:

- As macrografias 7.2 e 7.4 das soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ apresentaram poros próximos à superfície. Esta descontinuidade (porosidade) foi detectada na inspeção visual e foi atribuído a problemas no misturador de gás.

- As demais macrografias não apresentaram descontinuidades.

4- Soldas com CO_2 , $\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ e $\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$, figuras 5.30, 5.31, 5.32 e 5.18:

- Não foram observadas descontinuidades nas macrografias das soldas executadas com estes gases.

Estes resultados, juntamente com a inspeção visual e por líquido penetrante (item 5.1.2), para as soldas que não apresentaram porosidades superficiais e internas, mostram indícios de que é possível soldar o aço carbono pelo processo MIG-MAG com os gases Ar com no máximo $6\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2$ com no máximo $4\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ com no máximo $2\%\text{H}_2$ e CO_2 com no máximo $6\%\text{H}_2$ nos parâmetros de soldagem empregados.

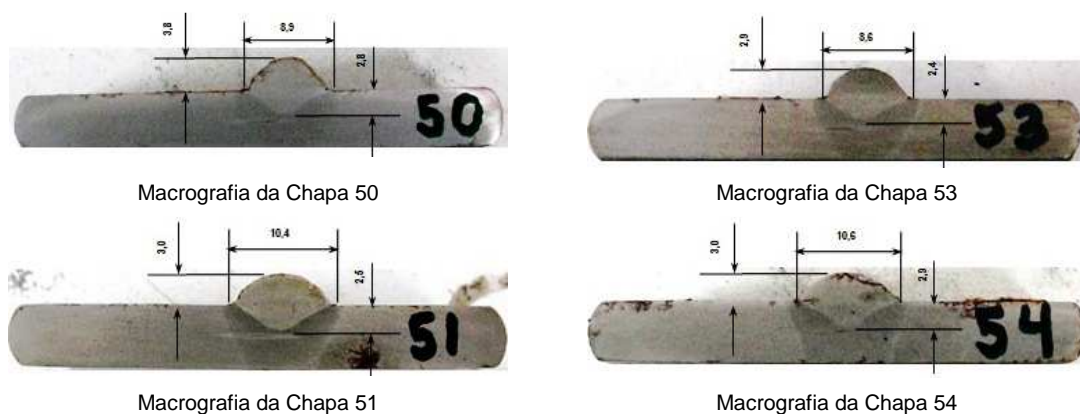


Figura 5.19 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com $\text{Ar}+2\%\text{H}_2$.

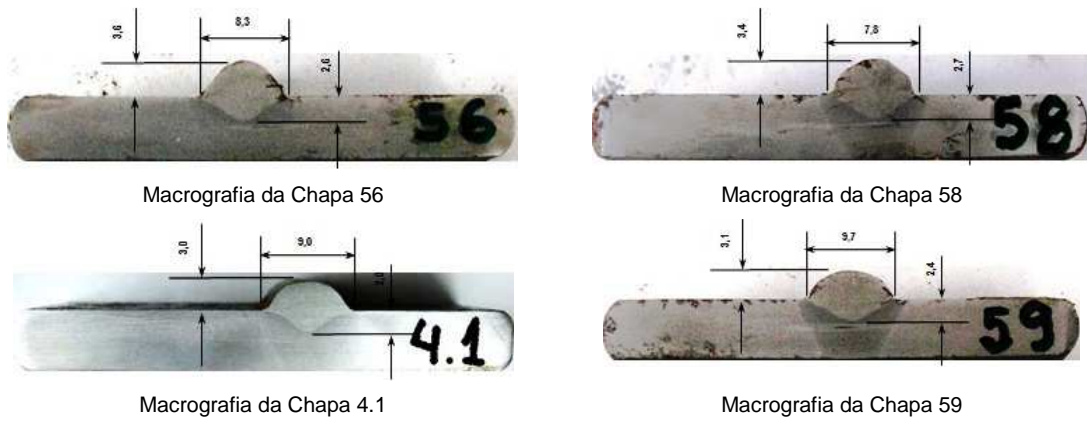


Figura 5.20 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+4% H_2 .

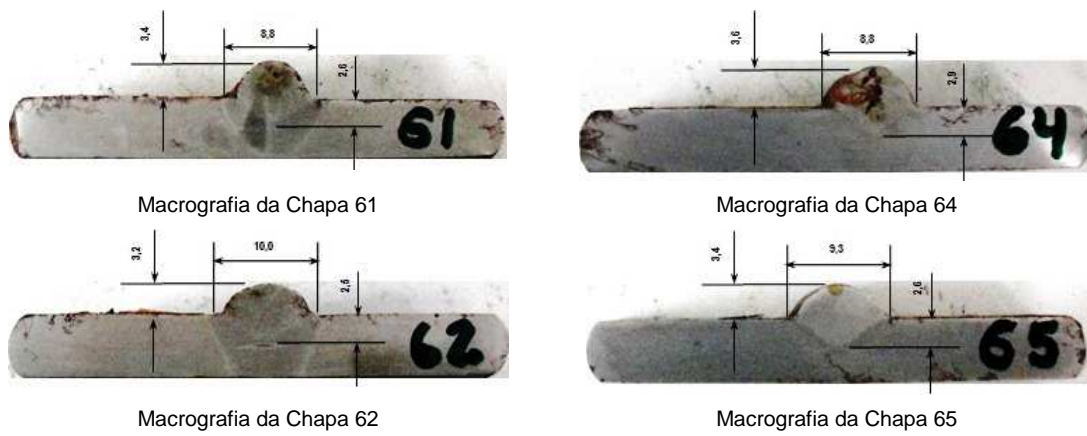


Figura 5.21 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+6% H_2 .

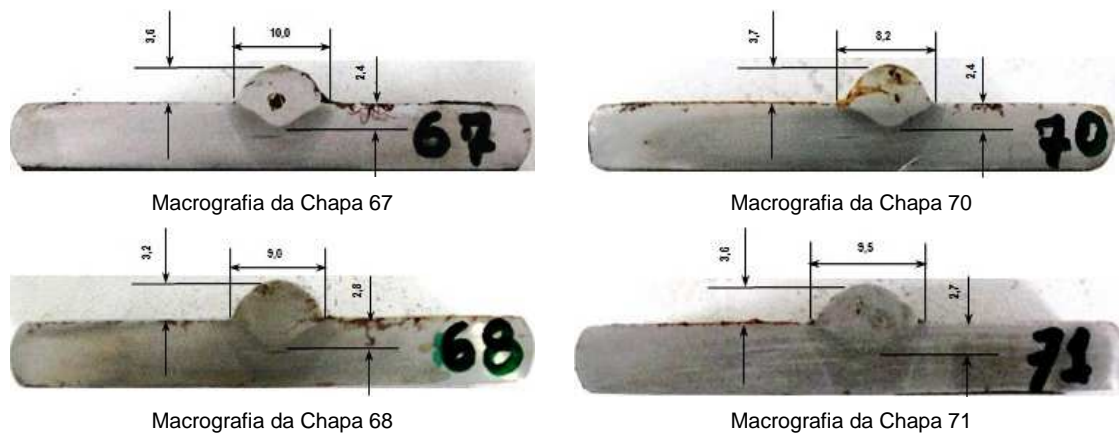


Figura 5.22 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+8% H_2 .

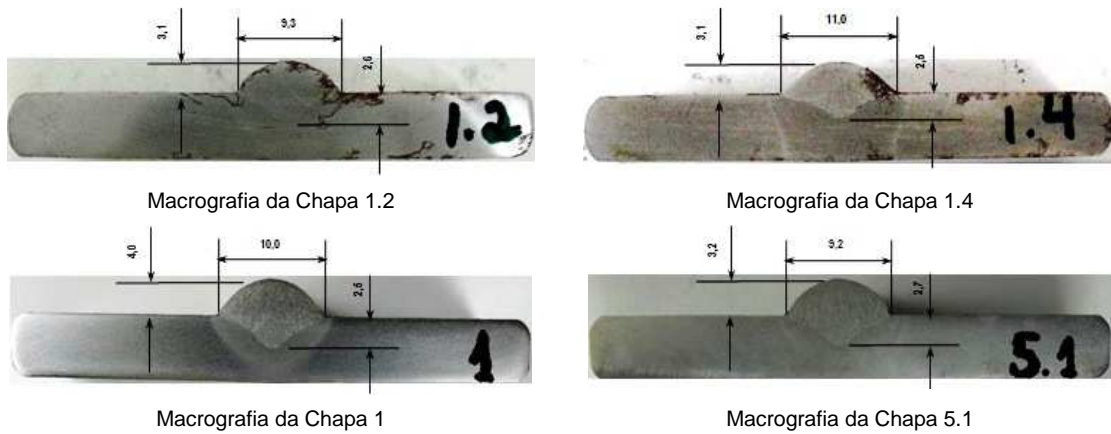


Figura 5.23 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com $Ar+10\%CO_2$.

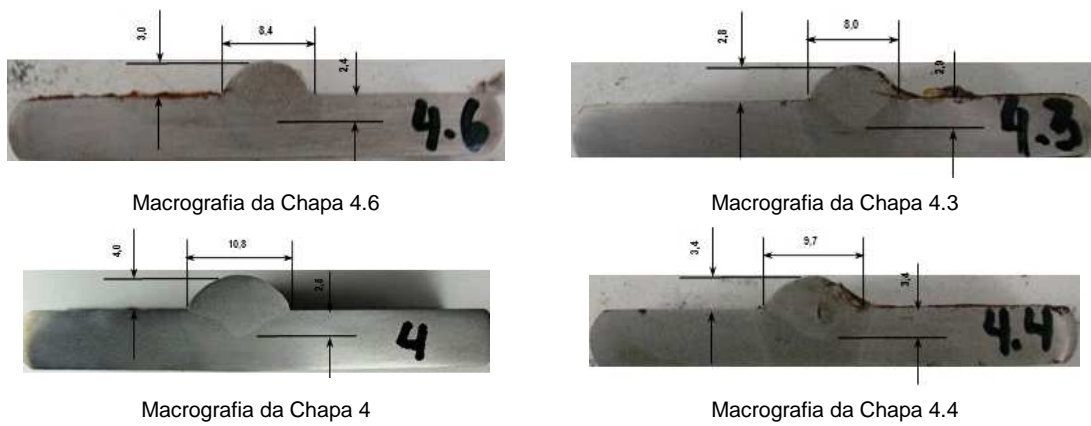


Figura 5.24 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com $Ar+10\%CO_2+2\%H_2$.

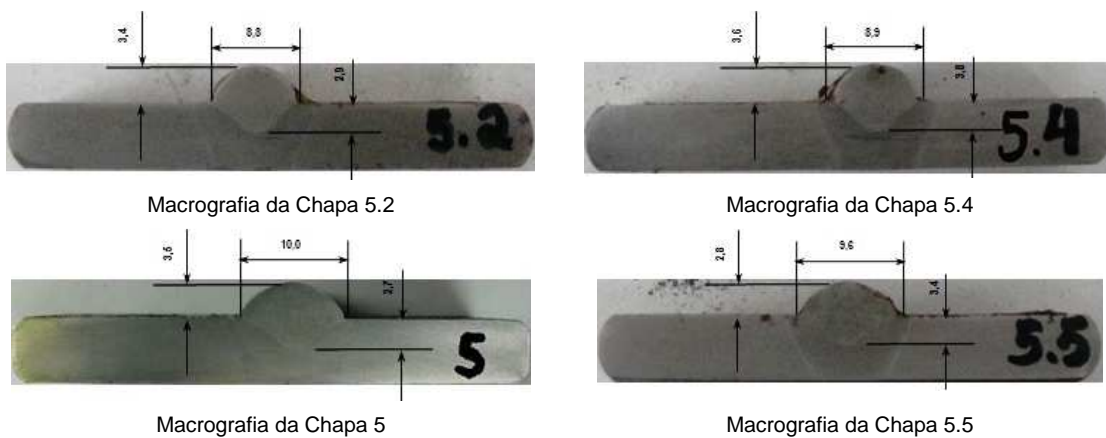
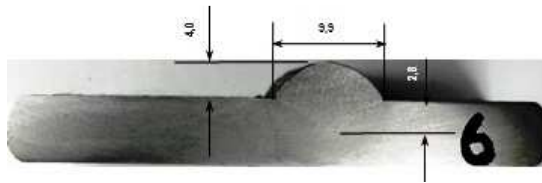
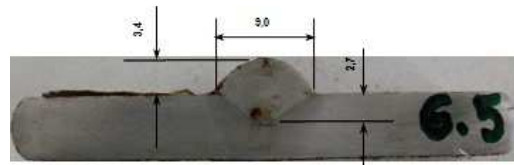


Figura 5.25 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com $Ar+10\%CO_2+4\%H_2$.

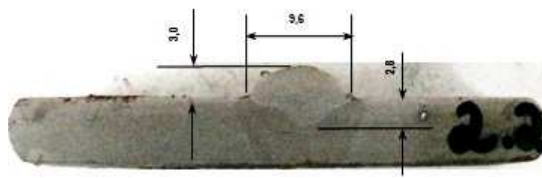


Macrografia da Chapa 6

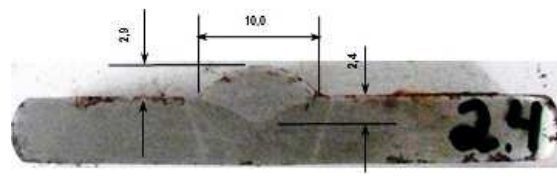


Macrografia da Chapa 6.5

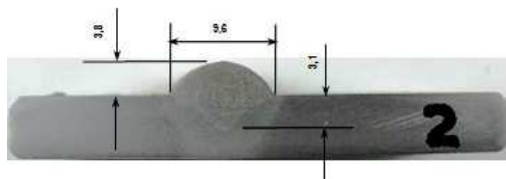
Figura 5.26 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+10%CO₂+6%H₂.



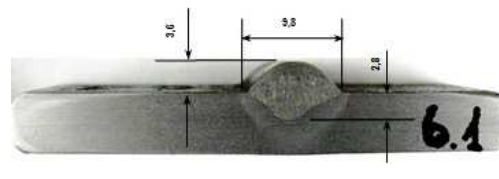
Macrografia da Chapa 2.2



Macrografia da Chapa 2.4

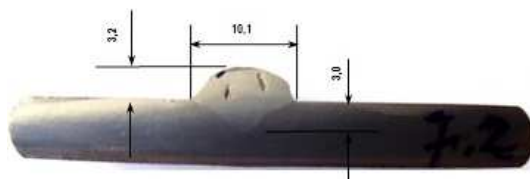


Macrografia da Chapa 2

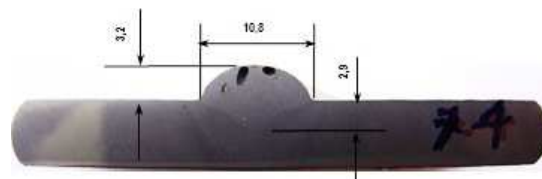


Macrografia da Chapa 6.1

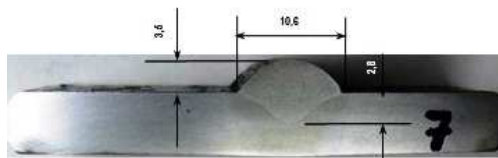
Figura 5.27 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+25%CO₂.



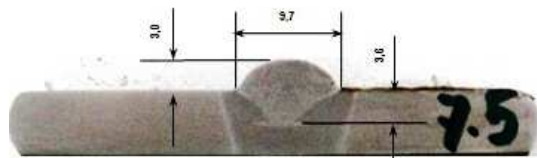
Macrografia da Chapa 7.2



Macrografia da Chapa 7.4

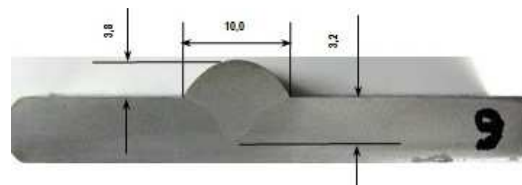


Macrografia da Chapa 7



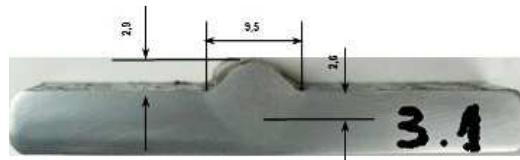
Macrografia da Chapa 7.5

Figura 5.28 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+25%CO₂+2%H₂.

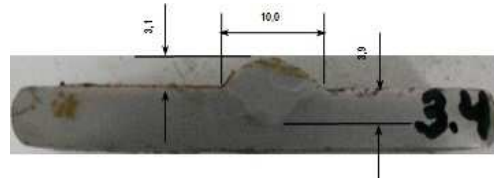


Macrografia da Chapa 9

Figura 5.29 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com Ar+25%CO₂+6%H₂.

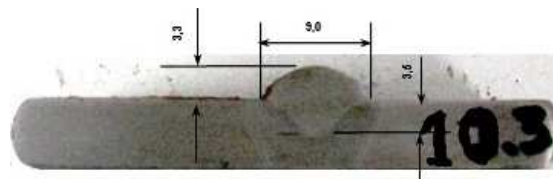


Macrografia da Chapa 3.1

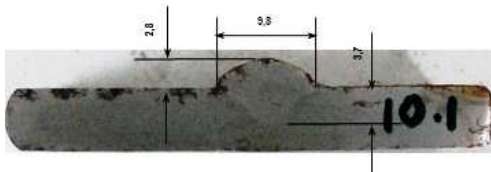


Macrografia da Chapa 3.4

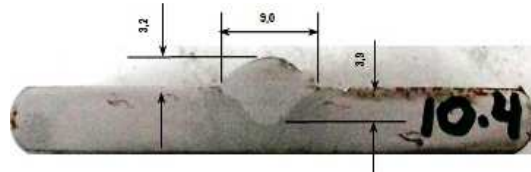
Figura 5.30 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com CO₂.



Macrografia da Chapa 10.3

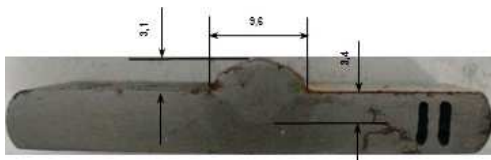


Macrografia da Chapa 10.1

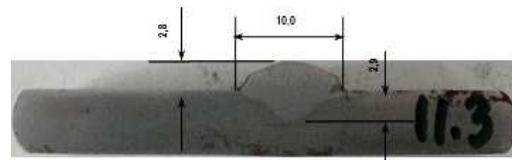


Macrografia da Chapa 10.4

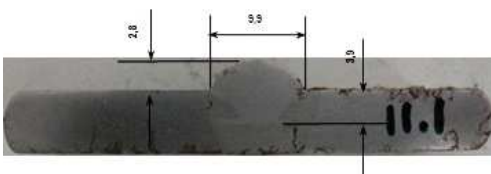
Figura 5.31 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com CO₂+2%H₂.



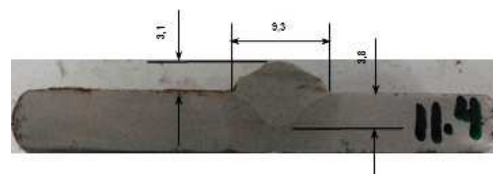
Macrografia da Chapa 11



Macrografia da Chapa 11.3



Macrografia da Chapa 11.1



Macrografia da Chapa 11.4

Figura 5.32 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com CO₂+4%H₂.

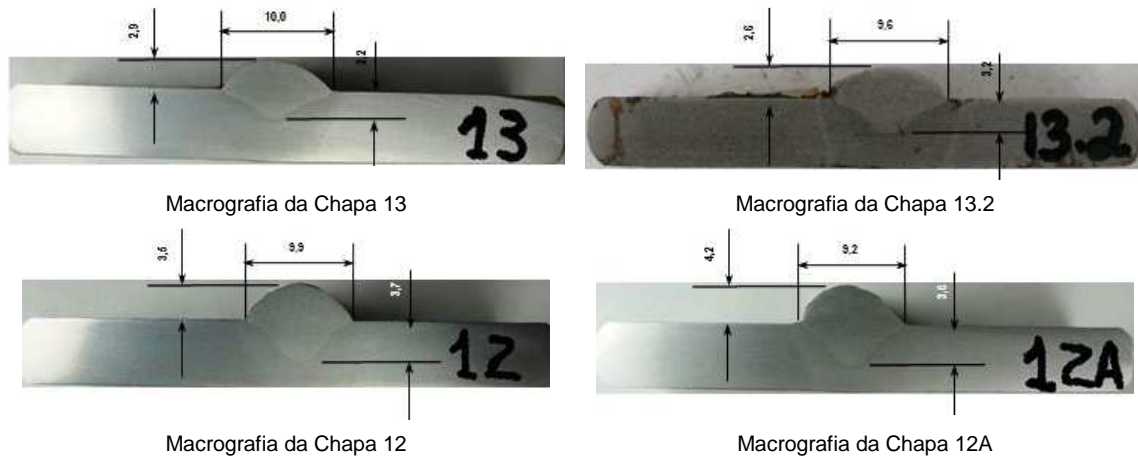


Figura 5.33 – Macrografias com altura do reforço (r), largura do cordão de solda (b) e a penetração das soldas com $\text{CO}_2+6\%\text{H}_2$.

Tabela 5.5 – Parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas com $\text{Ar}+2\%$ a 8% de H_2 .

Valores medidos e calculados (A, mm, %)					
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	Altura do reforço - r (mm)	Largura do cordão - b (mm)	Penetração (mm)	Índice de Convexidade - IC (%)
Ar+2%H2					
Tensão de 21,0V					
50	187,0	3,8	8,9	2,8	43
53	182,0	2,9	8,6	2,4	34
Tensão de 22,0V					
51	213,1	3,0	10,4	2,5	29
54	212,5	3,0	10,6	2,9	28
Ar+4%H2					
Tensão de 21,0V					
56	176,3	3,6	8,3	2,6	43
58	179,3	3,4	7,8	2,7	44
Tensão de 22,0V					
4.1	210,0	3,0	9,0	2,0	33
59	215,2	3,1	9,7	2,4	32
Ar+6%H2					
Tensão de 21,0V					
61	177,6	3,4	8,8	2,6	39
64	184,7	3,6	8,8	2,9	41
Tensão de 22,0V					
62	216,0	3,2	10,0	2,5	32
65	215,2	3,4	9,3	2,6	37

Tabela 5.6 – Parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas com Ar+10%CO₂ e Ar+10%CO₂+2% a 6% de H₂.

Valores medidos e calculados (A, mm, %)					
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	Altura do reforço - r (mm)	Largura do cordão - b (mm)	Penetração (mm)	Índice de Convexidade - IC (%)
Ar+10%CO₂					
Tensão de 21,0V					
1.2	198,9	3,1	9,3	2,6	33
1.4	195,7	3,1	11,0	2,5	28
Tensão de 22,0V					
1	249,0	4,0	10,0	2,5	40
5.1	238,5	3,2	9,2	2,7	35
Ar+10%CO₂+2%H₂					
Tensão de 21,0V					
4.6	190,0	3,0	8,4	2,4	36
4.3	189,3	2,8	8,0	2,9	35
Tensão de 22,0V					
4	247,5	4,0	10,8	2,5	37
4.4	231,8	3,4	9,7	3,4	35
Ar+10%CO₂+4%H₂					
Tensão de 21,0V					
5.2	188,7	3,4	8,8	2,9	39
5.4	188,7	3,6	8,9	3,8	40
Tensão de 22,0V					
5	239,9	3,5	10,0	2,7	35
5.5	234,6	2,8	9,6	3,4	29
Ar+10%CO₂+6%H₂					
Tensão de 22,0V					
6	250,8	4,0	9,9	2,8	40
6.5	226,7	3,4	9,0	2,7	38

Tabela 5.7 - Parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2% a 6% de H₂.

Valores medidos e calculados (A, mm, %)					
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	Altura do reforço - r (mm)	Largura do cordão - b (mm)	Penetração - P (mm)	Índice de Convexidade - IC (%)
Ar+25%CO₂					
Tensão de 21,0V					
2.2	199,1	3,0	9,6	2,8	31
2.4	199,2	2,9	10,0	2,4	29
Tensão de 22,0V					
2	248,9	3,8	9,6	3,1	40
6.1	211,3	3,6	9,8	2,8	37
Ar+25%CO₂+2%H₂					
Tensão de 21,0V					
7.2	199,3	3,2	10,1	3,0	32
7.4	189,3	3,2	10,8	2,9	30
Tensão de 22,0V					
7	245,9	3,5	10,6	2,8	33
7.5	228,9	3,0	9,7	3,6	31
Ar+25%CO₂+6%H₂					
Tensão de 22,0V					
9	243,0	3,8	10,0	3,2	38

Tabela 5.8 - Parâmetros de soldagem, altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas com CO₂ e CO₂+2% a 6% de H₂.

Valores medidos e calculados (A, mm, %)					
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	Altura do reforço - r (mm)	Largura do cordão - b (mm)	Penetração - P (mm)	Índice de Convexidade - IC (%)
CO₂					
Tensão de 21,0V					
3.1	170,6	2,9	9,5	2,6	31
Tensão de 22,0V					
3.4	218,8	3,1	10,0	3,9	31
CO₂+2%H₂					
Tensão de 21,0V					
10.3	196,8	3,3	9,0	3,5	37
Tensão de 22,0V					
10.1	228,8	2,8	9,8	3,7	29
10.4	223,2	3,2	9,0	3,9	36
CO₂+4%H₂					
Tensão de 21,0V					
11	198,7	3,1	9,6	3,4	32
11.3	197,4	2,8	10,0	2,9	28
Tensão de 22,0V					
11.1	229,9	2,8	9,9	3,9	28
11.4	231,1	3,1	9,3	3,8	33
CO₂+6%H₂					
Tensão de 21,0V					
13	169,1	2,9	10,0	2,2	29
13.2	195,5	2,6	9,6	3,2	27
Tensão de 22,0V					
12	246,5	3,5	9,9	3,7	35
12A	242,4	4,2	9,2	3,6	46

5.1.3.1 Índice de Convexidade (IC)

A figura 5.34 mostra o gráfico Índice de Convexidade (IC) X Teor de H₂ com os dados das tabelas 5.5 a 5.8, cujos valores de IC foram relativos a todos os experimentos nos dois níveis de tensão (21,0 e 22,0 V). O formato do cordão de solda é mais adequado quanto menor for o IC. As seguintes tendências foram observadas:

- O IC aumentou com o aumento do teor de H₂ no gás de proteção.
- As inclinações das linhas de tendência são praticamente paralelas para todas as misturas gasosas, indicando ser um efeito do H₂ a tendência de aumentar o IC.

- Os valores de IC foram menores para o gás CO₂ seguido pelo Ar+25%CO₂, Ar+10%CO₂ e Ar. O mesmo comportamento se obteve para estes gases com suas respectivas misturas com H₂.
- As soldas com CO₂ e Ar+25%CO₂ e suas misturas com H₂ tiveram os menores valores de IC entre todos os gases avaliados.
- A grande dispersão dos valores de IC, para cada teor de H₂, foi devido ao uso dos resultados para os dois níveis de tensão e por ter sido executada apenas uma macrografia para cada experimento.

De acordo com o descrito, os valores de IC aumentaram com o aumento do teor de H₂ nos gases de proteção comerciais, porém não pode ser confirmado se este fato foi devido exclusivamente à adição de H₂.

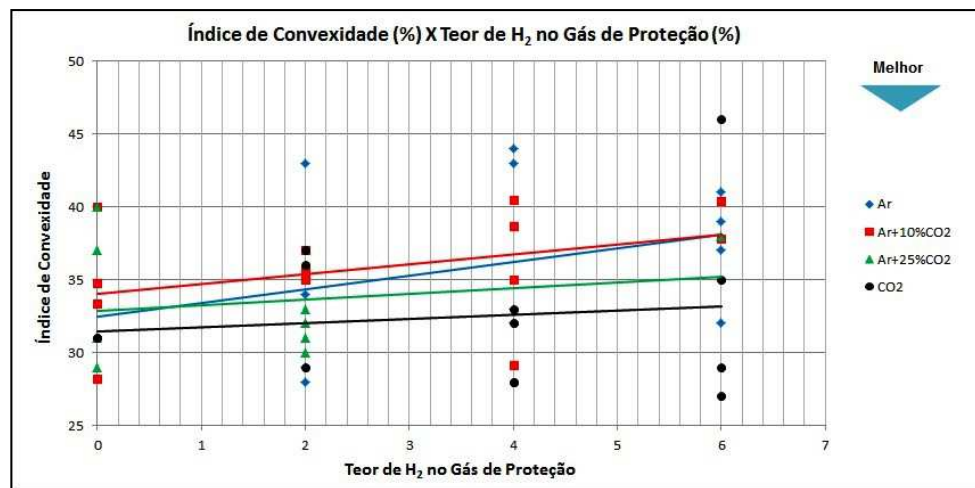


Figura 5.34 – Gráfico Índice de Convexidade X Teor de H₂ no Gás de Proteção para as soldas realizadas com os gases de proteção utilizados na primeira etapa da pesquisa.

5.1.3.2 Penetração

A figura 5.35 mostra o gráfico Penetração X Teor de H₂ no Gás de Proteção e a figura 5.36 o gráfico Penetração X Corrente de Soldagem, ambos elaborados com os dados das tabelas 5.5 a 5.8. Os valores de penetração, para os dois gráficos, foram relativos a todos os experimentos nos dois níveis de tensão. As seguintes tendências foram observadas:

- 1- Pelo gráfico Penetração X Teor de H₂ no Gás de Proteção (figura 5.35)
 - Para as soldas com os gases comerciais a que obteve maior penetração foi com CO₂ seguida de Ar+25%CO₂, Ar+10%CO₂ e Ar. O mesmo comportamento se obteve para estes gases com suas respectivas adições de H₂.

- A penetração aumentou discretamente com o aumento do teor de H_2 nas soldas com $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+10\%CO_2$. Para as soldas com Ar a adição de H_2 não influenciou na penetração, pois esta se manteve constante.

- Para a soldas com CO_2 a adição de H_2 a penetração diminuiu discretamente.

- Como na avaliação do IC, a grande dispersão dos valores de penetração também foi atribuída pelo uso dos resultados das duas tensões de soldagem e pela pouca quantidade de macrografias executadas por experimento.

2- Pelo gráfico Penetração X Corrente de soldagem, figura 5.36:

- O aumento de corrente de soldagem provocou o aumento da penetração nas soldas com os gases $Ar+25\%CO_2$, CO_2 e estes com teores de 2% a 6% H_2 . Nas soldas com CO_2 e $CO_2+2\%$ a 6% H_2 a influência da corrente foi mais acentuada.

- Para as soldas com $Ar+2\%$ a 6% H_2 , $Ar+10\%CO_2$ e $Ar+10\%CO_2+2\%$ a 6% H_2 , as penetrações diminuíram com o aumento da corrente de soldagem. Isto pode ser explicado pela diminuição do potencial de oxidação destes gases devido a redução do oxigênio, dissociado na coluna de plasma, pelo hidrogênio. Conforme Filho et al. (2007), o dióxido de carbono é um gás ativo nas elevadas temperaturas de soldagem, possui uma alta condutividade térmica que produz transferência de calor para o metal de base e produz uma penetração mais larga e arredondada quando comparado com o argônio.

- As soldas com CO_2 e $Ar+25\%CO_2$ e suas misturas com H_2 tiveram os maiores penetrações entre todos os gases avaliados.

Pelo exposto, a variação da Penetração foi predominantemente devido ao aumento de corrente de soldagem. Segundo Fortes (2005), o aumento da penetração está ligado diretamente ao aumento de corrente de soldagem. Na soldagem MIG-MAG, se todas as variáveis de soldagem forem mantidas constantes, um aumento na corrente de soldagem aumenta a penetração e largura do cordão de solda (Moreira, 2008).

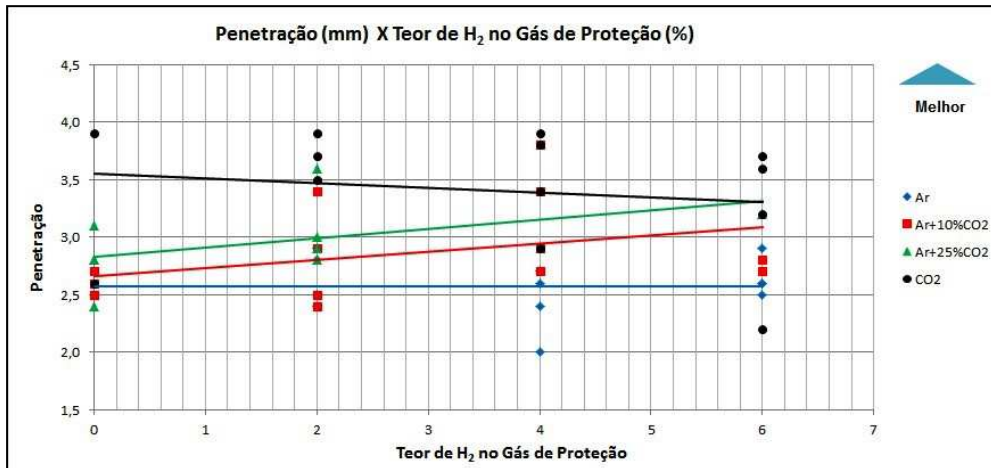


Figura 5.35 – Gráfico Penetração X Teor de H₂ no Gás de Proteção para as soldas realizadas com os gases de proteção utilizados na primeira etapa da pesquisa.

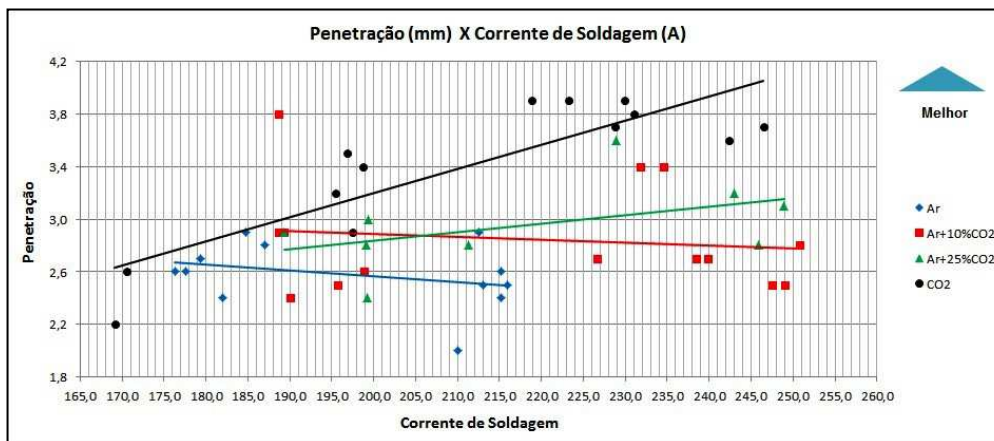


Figura 5.36 – Gráfico Penetração X Corrente de Soldagem para as soldas realizadas com os gases de proteção utilizados na primeira etapa da pesquisa.

5.1.4 Análise da estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos

As tabelas 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 mostram os parâmetros de soldagem, os índices de estabilidade Desvio Padrão Picos de Corrente (DPPC), Desvio Padrão Período de Arco Aberto (DPAA), Desvio Padrão Período de Curto-circuito (DPCC) e Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-circuito (IVcc).

Tabela 5.9 – Parâmetros de soldagem, DPPC, DPAA, DPCC e para as soldas com Ar mais 2 a 6% de H₂.

Valores medidos e calculados (A, ms)					
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	DPPC registrada no SAP (A)	DPAA registrada no SAP (ms)	DPCC registrada no SAP (ms)	IVcc
Ar+2%H₂					
Tensão de 21,0V					
50	187,0	78,3	9,8	2,0	1,14
53	182,0	81,6	10,0	2,1	1,14
Tensão de 22,0V					
51	213,1	75,5	7,2	2,2	1,25
54	212,5	77,2	7,5	2,1	1,22
Ar+4%H₂					
Tensão de 21,0V					
56	176,3	86,5	9,4	2,5	1,17
58	179,3	88,2	9,7	2,3	1,10
Tensão de 22,0V					
4.1	210,0	52,0	9,8	1,1	1,03
59	215,2	79,4	7,5	2,4	1,23
Ar+6%H₂					
Tensão de 21,0V					
61	177,6	85,2	8,6	2,4	1,08
64	184,7	84,7	8,9	2,2	1,06
Tensão de 22,0V					
62	216,0	76,8	6,3	2,3	1,19
65	215,2	82,8	7,2	2,6	1,23

Tabela 5.10 – Parâmetros de soldagem, DPPC, DPAA, DPCC e para as soldas com Ar+10%CO₂ e Ar+10%CO₂+2% a 6%H₂.

Valores medidos e calculados (A, ms)					
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	DPPC registrada no SAP (A)	DPAA registrada no SAP (ms)	DPCC registrada no SAP (ms)	IVcc
Ar+10%CO₂					
Tensão de 21,0V					
1.2	198,9	56,0	6,8	1,5	1,40
1.4	195,7	65,8	7,9	1,6	1,51
Tensão de 22,0V					
1	249,0	52,0	4,1	1,2	1,36
5.1	238,5	55,6	4,2	1,3	1,35
Ar+10%CO₂+2%H₂					
Tensão de 21,0V					
4.6	190,0	64,1	5,3	1,5	0,87
4.3	189,3	76,2	6,4	1,8	0,98
Tensão de 22,0V					
4	247,5	56,8	5,1	1,3	1,32
4.4	231,8	76,1	4,3	2,2	1,25
Ar+10%CO₂+4%H₂					
Tensão de 21,0V					
5.2	188,7	79,4	6,2	1,8	0,90
5.4	188,7	80,0	6,2	1,8	0,89
Tensão de 22,0V					
5	239,9	55,8	4,1	1,4	1,25
5.5	234,6	78,1	4,4	2,2	1,29
Ar+10%CO₂+6%H₂					
Tensão de 21,0V					
6.2	190,0	67,0	4,0	1,6	0,70
6.4	190,6	85,3	5,1	1,9	0,77
Tensão de 22,0V					
6	250,8	55,5	4,9	1,2	1,24
6.5	226,7	82,7	4,5	2,6	1,17

Tabela 5.11 – Parâmetros de soldagem, DPPC, DPAA, DPCC e para as soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2% a 6%H₂.

Valores medidos e calculados (A, ms)					
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	DPPC registrada no SAP (A)	DPAA registrada no SAP (ms)	DPCC registrada no SAP (ms)	IVcc
Ar+25%CO₂					
Tensão de 21,0V					
2.2	199,1	45,5	3,9	1,3	1,15
2.4	199,2	51,3	4,5	1,4	1,28
Tensão de 22,0V					
2	248,9	54,2	3,9	1,2	1,34
6.1	211,3	52,8	4,9	1,2	1,23
Ar+25%CO₂+2%H₂					
Tensão de 21,0V					
7.2	199,3	36,7	2,8	1,0	0,78
7.4	189,3	39,6	2,8	1,1	0,84
Tensão de 22,0V					
7	245,9	51,0	3,5	1,2	1,24
7.5	228,9	54,0	3,5	1,3	1,27
Ar+25%CO₂+4%H₂					
Tensão de 21,0V					
8.1	193,8	40,1	2,5	1,1	0,68
Tensão de 22,0V					
8	226,8	58,3	3,5	1,5	1,22
8.4	219,5	51,0	2,9	1,3	0,96
Ar+25%CO₂+6%H₂					
Tensão de 21,0V					
9.1	194,6	47,1	2,2	1,2	0,61
9.3	Não foi soldado				
Tensão de 22,0V					
9	243,0	59,3	4,2	1,4	1,44
9.4	227,8	58,7	3,3	1,6	1,11

Tabela 5.12 – Parâmetros de soldagem, DPPC, DPAA, DPCC e para as soldas com CO₂ e CO₂+2% a 6%H₂.

Valores medidos e calculados (A, ms)					
Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	DPPC registrada no SAP (A)	DPAA registrada no SAP (ms)	DPCC registrada no SAP (ms)	IVcc
CO₂					
Tensão de 21,0V					
3.1	170,6	82,5	8,4	2,7	1,06
Tensão de 22,0V					
3.4	218,8	62,0	4,5	1,4	1,27
CO₂+2%H₂					
Tensão de 21,0V					
10.3	196,8	56,4	3,8	1,6	1,07
Tensão de 22,0V					
10.1	228,8	62,8	4,2	1,6	1,21
10.4	223,2	60,2	4,5	1,4	1,26
CO₂+4%H₂					
Tensão de 21,0V					
11	198,7	53,9	3,7	1,7	1,08
11.3	197,4	54,4	3,6	1,5	1,05
Tensão de 22,0V					
11.1	229,9	61,0	4,0	1,5	1,29
11.4	231,1	62,0	3,9	1,6	1,20
CO₂+6%H₂					
Tensão de 21,0V					
13	169,1	46,9	6,2	1,5	1,13
13.2	195,5	55,0	3,7	1,7	1,05
Média	182,3	51,0	5,0	1,6	1,09
Tensão de 22,0V					
12	246,5	64,7	3,7	1,7	1,13
12A	242,4	66,5	4,0	1,7	1,25

Com os dados das tabelas 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, foram elaborados gráficos para avaliação de DPPC, DPAA, DPCC e IVcc em relação ao teor de H₂ no gás para soldas com os gases propostos. Foram efetuadas duas análises: a primeira com todos os valores medidos por gás nos dois níveis de tensão (21,0 e 22,0 V) e a seguir foram analisados separadamente pela tensão. Para a avaliação comparativa com os gases comerciais sem adição de H₂, quanto menor o valor destes índices mais estável é o arco elétrico.

5.1.4.1 Desvio Padrão de Picos de Corrente (DPPC)

A figura 5.37 mostra o gráfico DPPC x Teor de H₂ para os 4 gases de proteção convencionais e para os 2 valores de tensão usados (21,0 e 22,0 V). Os valores de DPPC e tensão de soldagem estão de acordo com as tabelas 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. As seguintes tendências foram observadas:

- Dos gases convencionais, a solda com Ar+25%CO₂ foi a que apresentou o menor DPPC (arco elétrico mais estável), seguido do gás Ar+10%CO₂, CO₂ e Ar. Com a adição de H₂ nestes gases o arco mais estável foi para as soldas com Ar+25%CO₂ seguido de CO₂, Ar+10%CO₂ e Ar, todos com 2 a 6% H₂
- A adição de H₂ aumentou o DPPC para os gases Ar, Ar+10%CO₂ e Ar+25%CO₂, ou seja, piorou a estabilidade do arco. Já para o CO₂, a adição de H₂ reduziu o DPPC, ou seja, melhorou a estabilidade do arco.

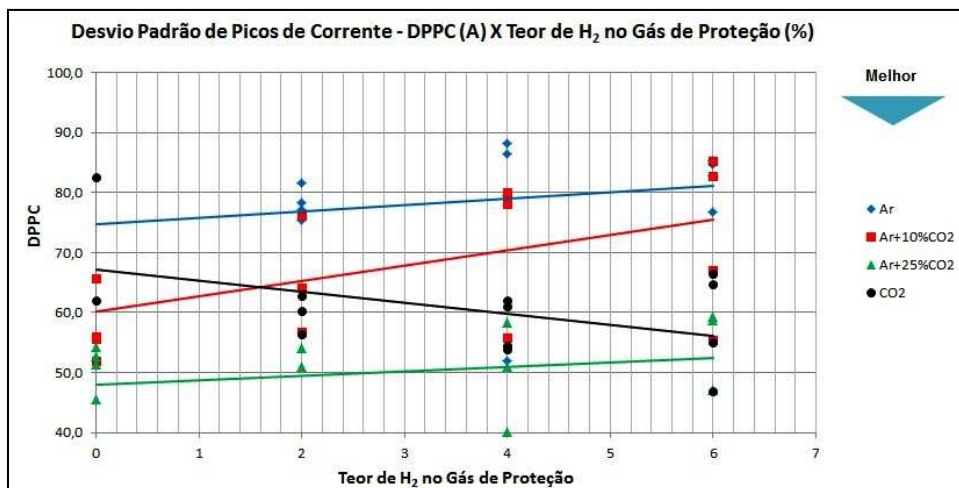
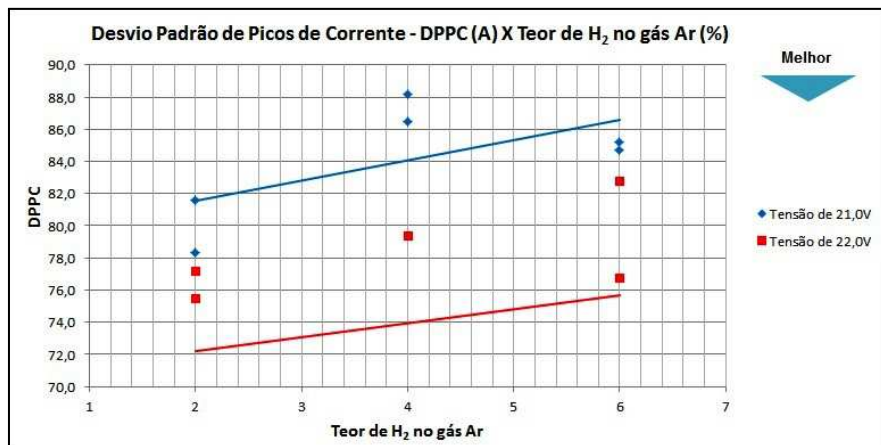


Figura 5.37 - Gráfico DPPC x Teor de H₂ no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados.

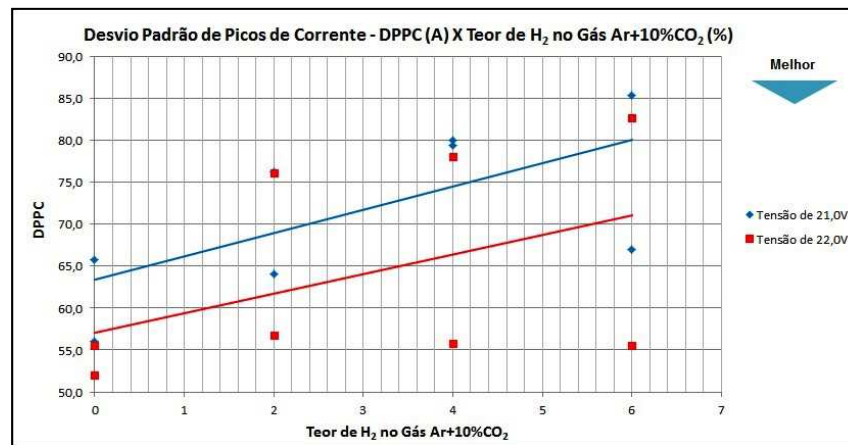
A figura 5.38 mostra o gráfico DPPC x Teor de H₂ para os 4 gases de proteção convencionais e para cada tensão de soldagem. Foram observadas as seguintes tendências:

- Para as soldas com Ar e Ar+10%CO₂ o aumento de H₂ na mistura aumentou o DPPC para as duas tensões, ou seja, piorou a estabilidade do arco. A estabilidade do arco foi melhor para a tensão de 22,0 V que para a tensão de 21,0 V.
- Para o gás Ar+25%CO₂ o aumento de H₂ na mistura reduziu ligeiramente o DPPC para a tensão de 21,0 V, ou seja, melhorou a estabilidade do arco. Já para a tensão de 22,0 V aumentou o DPPC, ou seja, piorou a estabilidade do arco. A estabilidade do arco foi melhor para a tensão de 21,0 V que para a tensão de 22,0 V.
- Para o gás CO₂ o aumento de H₂ na mistura diminuiu DPPC para a tensão de 21,0 V, ou seja, melhorou a estabilidade do arco, e aumentou para tensão de

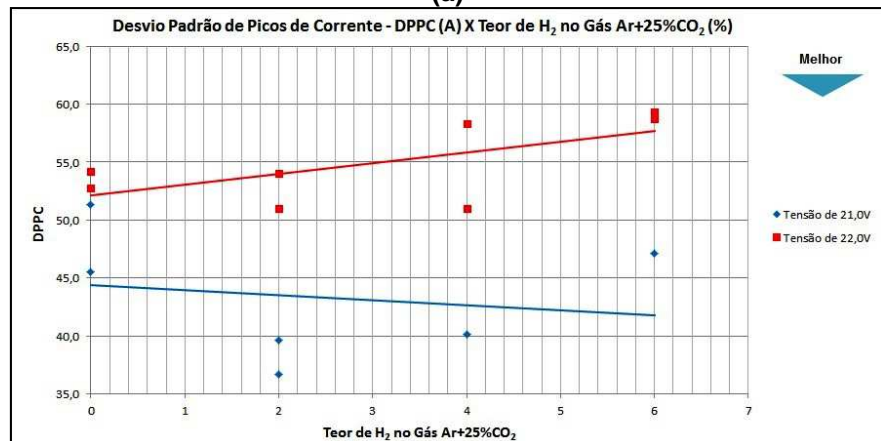
22,0 V. O arco mais estável foi para a solda com CO₂ com teores maiores que 2%H₂ na tensão de 21,0 V.



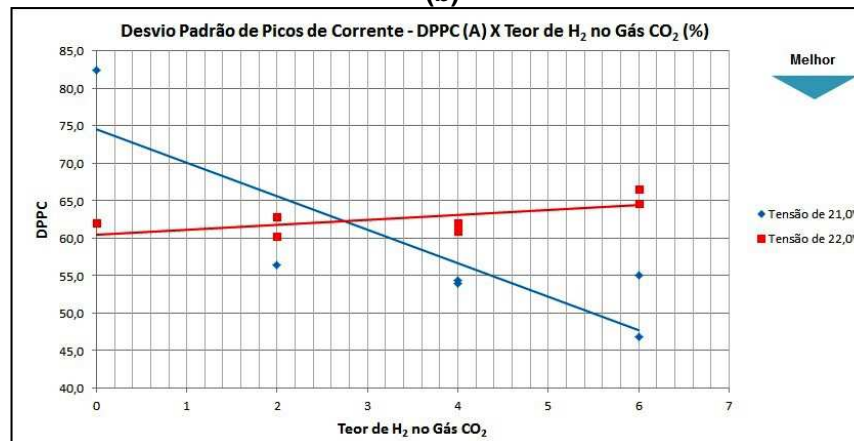
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.38 - Gráfico DPPC x Teor de H₂ no Gás (a) Ar, (b) Ar+10%CO₂, (c) Ar+25%CO₂ e (d) CO₂ para as tensões de 21,0 V e 22,0 V.

5.1.4.2 Desvio Padrão do Período de Arco Aberto (DPAA)

A figura 5.39 mostra o gráfico DPAA x Teor de H₂ para os 4 gases de proteção convencionais e para os 2 valores de tensão usados (21,0 e 22,0 V). Os valores de DPAC e tensão de soldagem estão de acordo com as tabelas 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. As seguintes tendências foram observadas:

- As soldas com os gases convencionais tiveram o Ar+25%CO₂ com menor DPAA (arco mais estável), seguido do gás CO₂, Ar+10%CO₂ e Ar.
- Para todos os gases utilizados o DPAA diminuiu com o acréscimo de H₂, ou seja, houve melhoria da estabilidade do arco. O arco mais estável foi das soldas com os gases Ar+25%CO₂+2% a 6%H₂ seguido de CO₂+2% a 6%H₂, Ar+10%CO₂+2% a 6%H₂ e Ar+2% a 6%H₂.

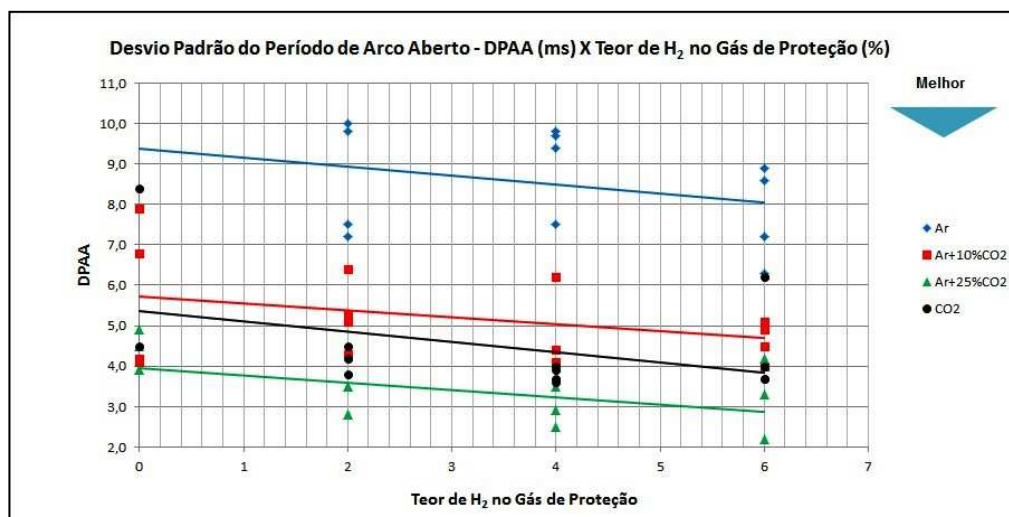


Figura 5.39 - Gráfico DPAA x Teor de H₂ no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados.

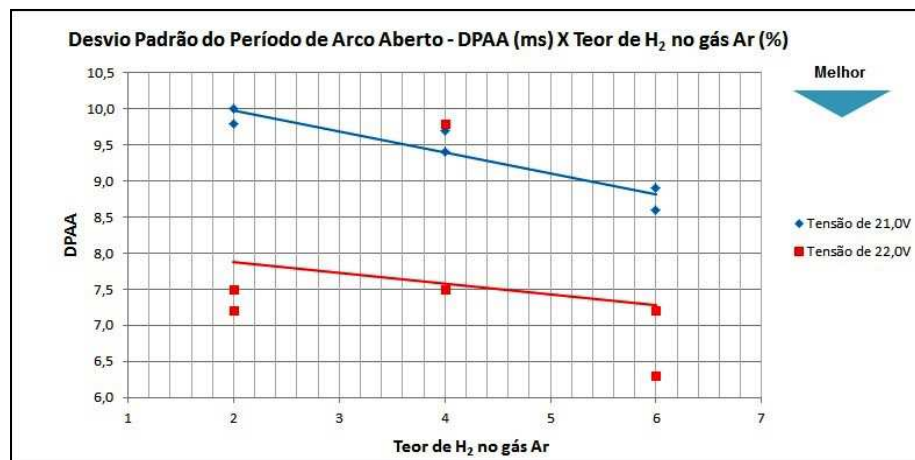
A figura 5.40 mostra o gráfico DPAA x Teor de H₂ para os 4 gases de proteção convencionais e para cada tensão de soldagem. Foram observadas as seguintes tendências:

- Para o Ar o aumento do teor de H₂ diminuiu o DPAA para as duas tensões de soldagem, ou seja, melhorou a estabilidade do arco elétrico. A estabilidade do arco foi melhor para a tensão de 22,0 V que para a tensão de 21,0 V.
- Para o Ar+10%CO₂ o aumento do teor de H₂ diminuiu discretamente o DPAA (melhorou a estabilidade) para a tensão de 21,0 V e aumentou para a tensão

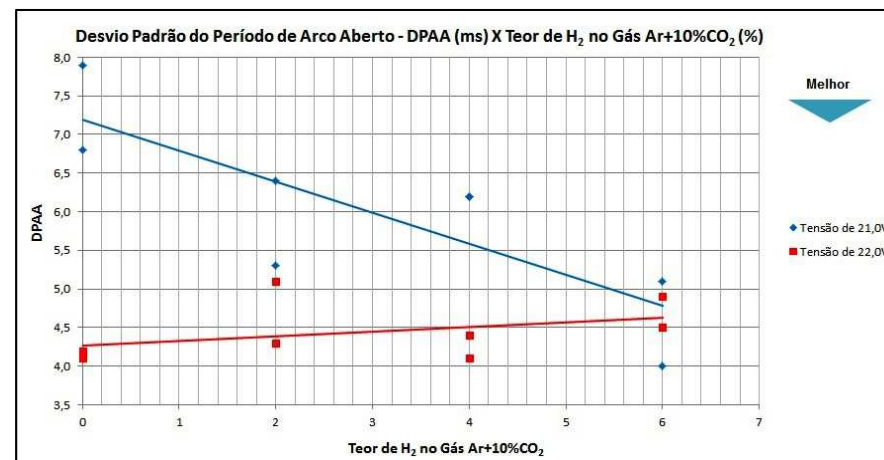
de 22,0 V. A estabilidade do arco foi melhor para a tensão de 22,0 V que para a tensão de 21,0 V.

- Para a mistura Ar+25%CO₂ o aumento de H₂ diminuiu o DPAA para as duas tensões de soldagem, ou seja, melhorou a estabilidade do arco. A estabilidade do arco foi melhor para a tensão de 21,0 V que para a tensão de 22,0 V.

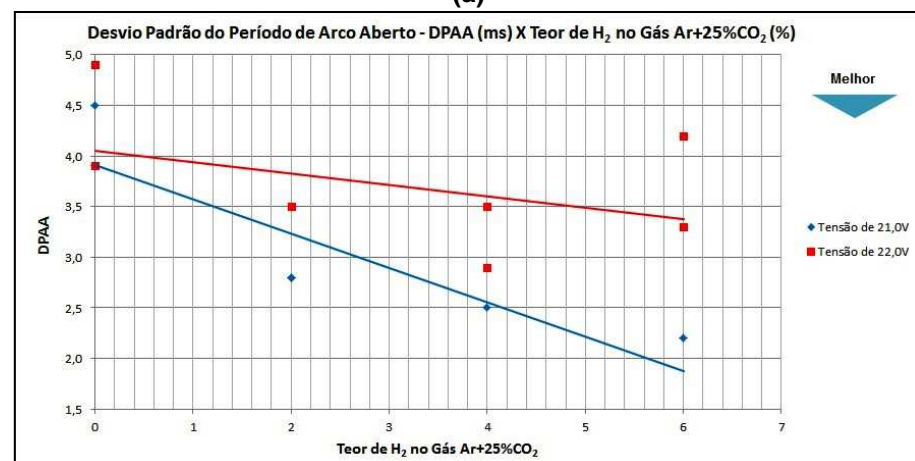
- Para o CO₂ puro o aumento da adição de H₂ também diminuiu o DPAA para as duas tensões, porém a estabilidade do arco foi melhor para a tensão de 22,0 V que para a tensão de 21,0 V.



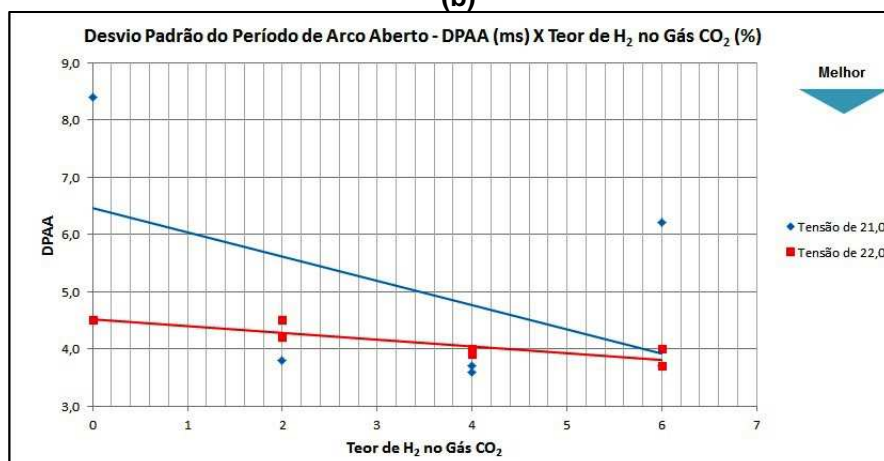
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.40 - Gráfico DPPC x Teor de H₂ no Gás (a) Ar, (b) Ar+10%CO₂, (c) Ar+25%CO₂ e (d) CO₂ para as tensões de 21,0 V e 22,0 V.

5.1.4.3 Desvio Padrão do Período de Curto-circuito (DPCC)

A figura 5.41 mostra o gráfico DPCC x Teor de H₂ para os 4 gases de proteção convencionais e para os 2 valores de tensão usados (21,0 e 22,0 V). Os valores de DPCC e tensão de soldagem estão de acordo com as tabelas 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. As seguintes tendências foram observadas:

- Para as soldas com os gases convencionais, o mais estável (menor DPCC) foi com Ar+25%CO₂, seguido de Ar+10%CO₂, CO₂ e Ar. Este comportamento foi também observado para o DPPC.

- Para todos os gases, com exceção do CO₂, o DPCC aumentou com o aumento de H₂ nas misturas, ou seja, piorou a estabilidade do arco elétrico. A adição de H₂ no CO₂ melhorou a estabilidade do arco.

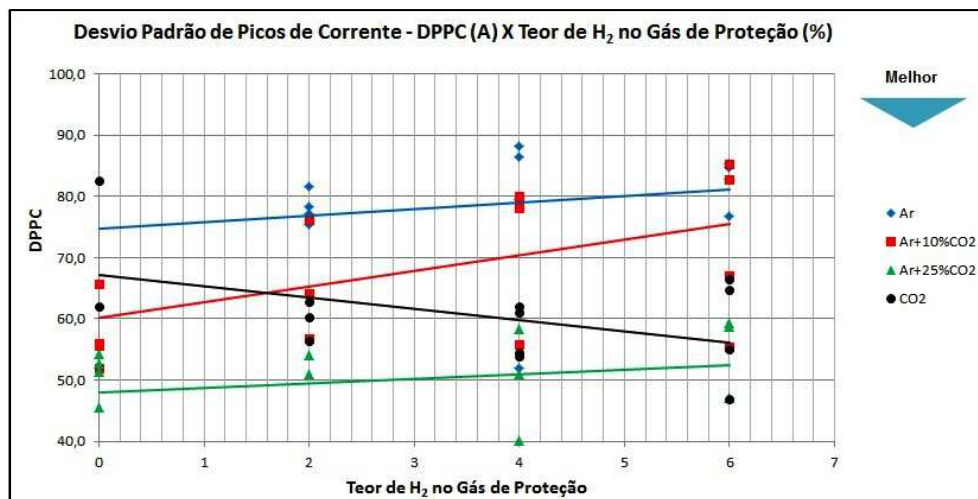


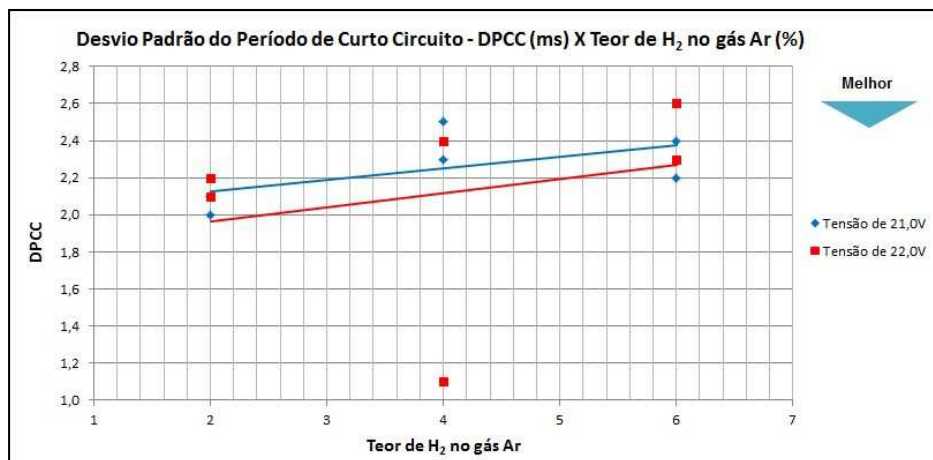
Figura 5.41 - Gráfico DPCC x Teor de H₂ no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados.

A figura 5.42 mostra o gráfico DPCC x Teor de H₂ para os 4 gases de proteção convencionais e para cada tensão de soldagem. Foram observadas as seguintes tendências:

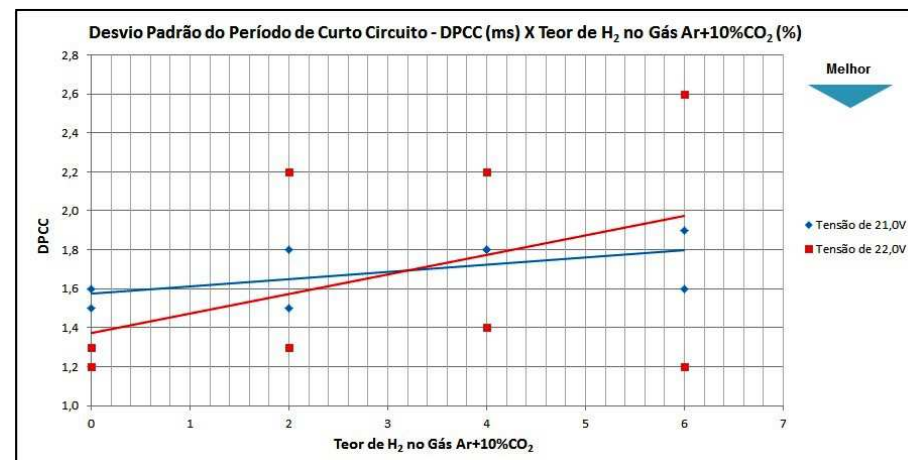
- O aumento de H₂ em misturas com Ar e Ar+10%CO₂ aumentou o DPCC para as duas tensões de soldagem, ou seja, piorou a estabilidade do arco elétrico.

- O aumento de H₂ nas misturas com Ar+25%CO₂ diminuiu o DPCC para a tensão de 21,0 V, ou seja, melhorou a estabilidade do arco e aumentou para 22,0 V, piorou a estabilidade. A estabilidade do arco foi melhor para a tensão de 21,0 V que para a tensão de 22,0 V.

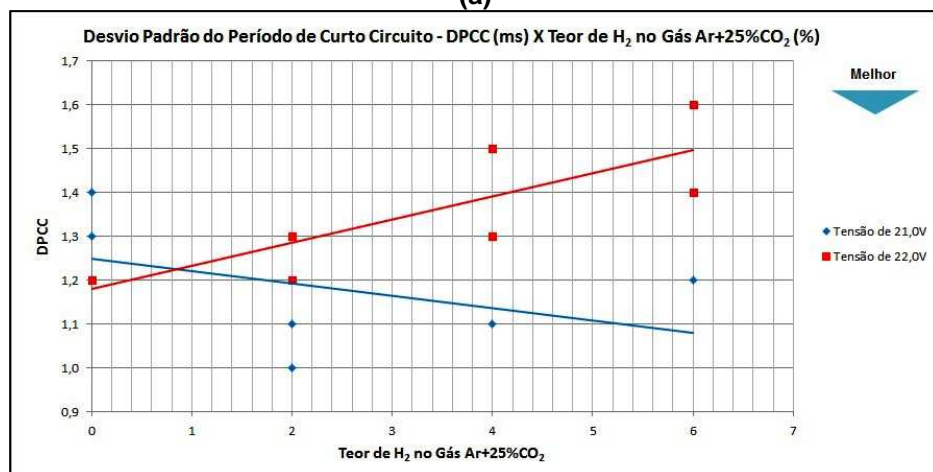
- Nas misturas de CO₂ o aumento de H₂ diminuiu o DPCC para a tensão de 21,0 V, ou seja, melhorou a estabilidade do arco, e aumentou para a tensão de 22,0 V. O arco mais estável foi para a solda com CO₂ com teores até 4%H₂ na tensão de 22,0 V.



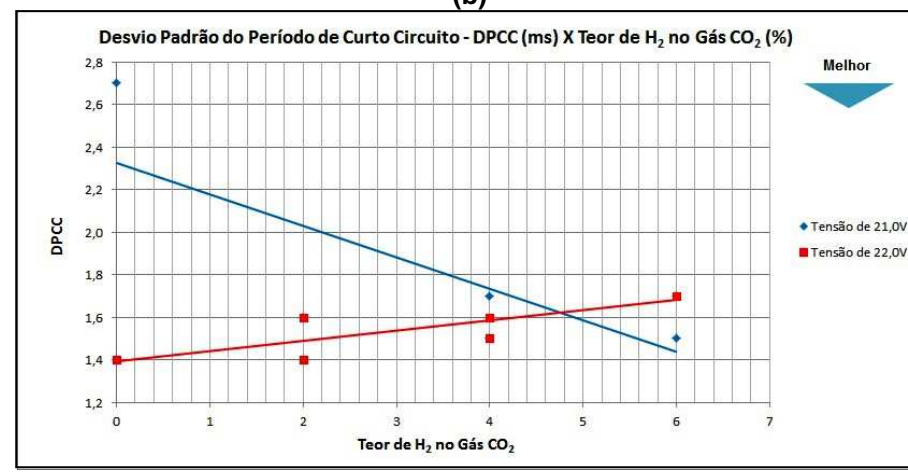
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.42 - Gráfico DPCC x Teor de H₂ no Gás (a) Ar, (b) Ar+10%CO₂, (c) Ar+25%CO₂ e (d) CO₂ para as tensões de 21,0 V e 22,0 V.

5.1.4.4 Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc)

A figura 5.43 mostra o gráfico IVcc x Teor de H₂ para os 4 gases de proteção convencionais e para os 2 valores de tensão usados (21,0 e 22,0 V). Os valores de IVcc e tensão de soldagem estão de acordo com as tabelas 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. As seguintes tendências foram observadas:

- Para as soldas com os gases convencionais o Ar+25%CO₂ foi o mais estável (menor IVcc), seguido do CO₂, Ar e Ar+10%CO₂.
- As soldas com o gás Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2% a 6%H₂ foram as que tiveram melhor estabilidade de arco elétrico (menor IVcc), seguido de Ar+10%CO₂+4% a 6%H₂, Ar+4% a 6%H₂ e CO₂+4% a 6%H₂.
- De uma forma geral, observa-se que a adição de H₂ diminuiu o IVcc para todos os gases, ou seja melhorou a estabilidade do arco.

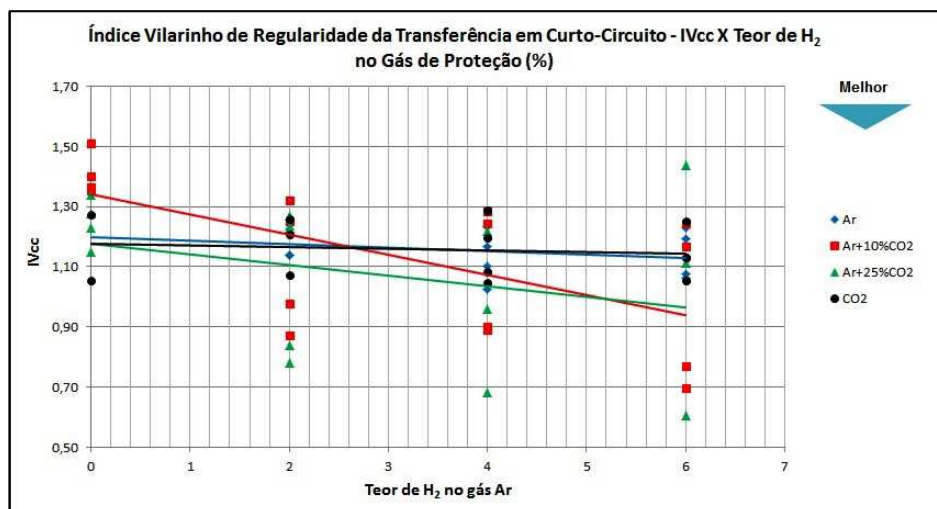
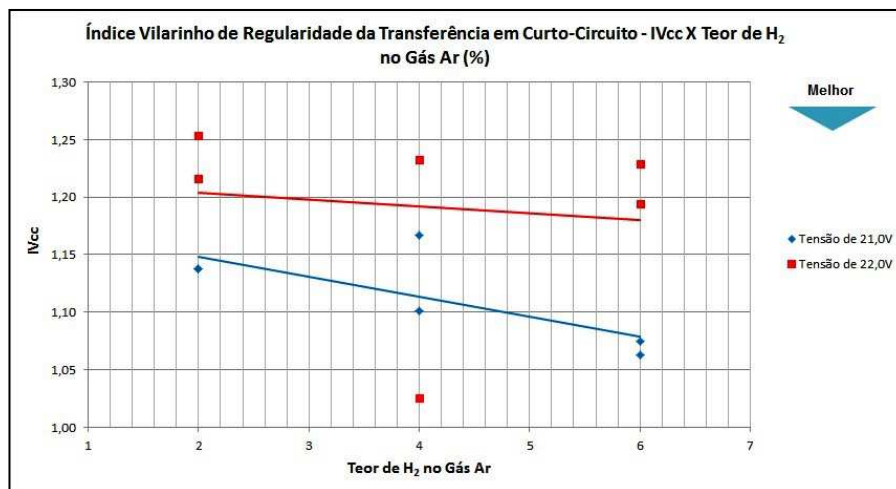


Figura 5.43 - Gráfico IVcc x Teor de H₂ no Gás de Proteção para todos os gases de proteção usados.

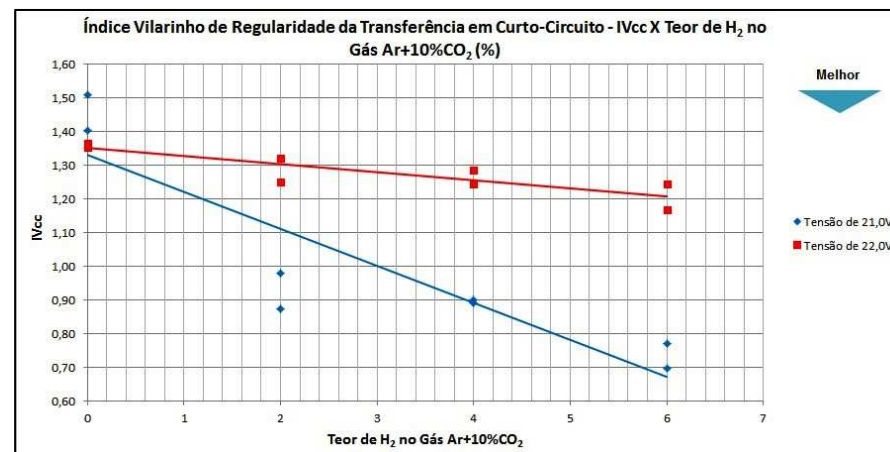
A figura 5.44 mostra o gráfico IVcc x Teor de H₂ para os 4 gases de proteção convencionais e para cada tensão de soldagem. Foram observadas as seguintes tendências:

- O aumento de H₂ em misturas com Ar, Ar+10%CO₂ e Ar+25%CO₂ diminuiu o IVcc para as duas tensões de soldagem, ou seja, melhorou a estabilidade do arco elétrico. A estabilidade do arco piorou ao aumentar a tensão de 21,0 para 22,0 V.

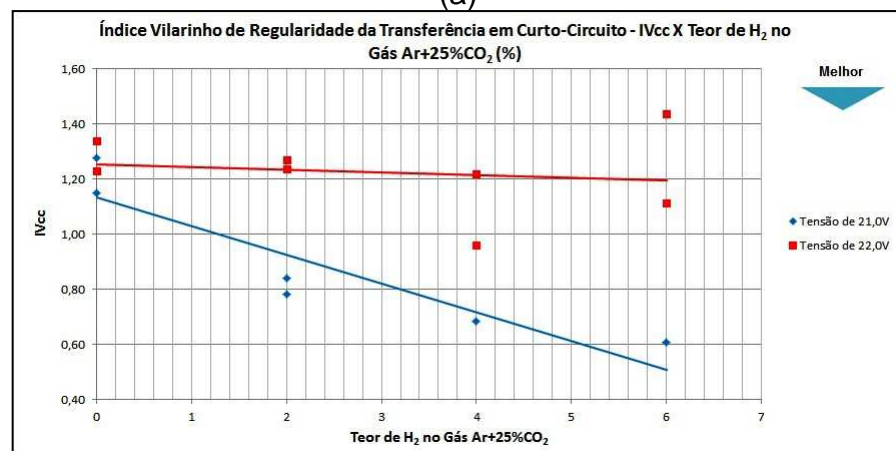
- Para o CO₂ puro o aumento de H₂ diminuiu o IVcc para a tensão de 22,0 V. Para 21,0 V o IVcc aumentou. A estabilidade do arco foi melhor para a tensão de 21,0 V que para a tensão de 22,0 V.



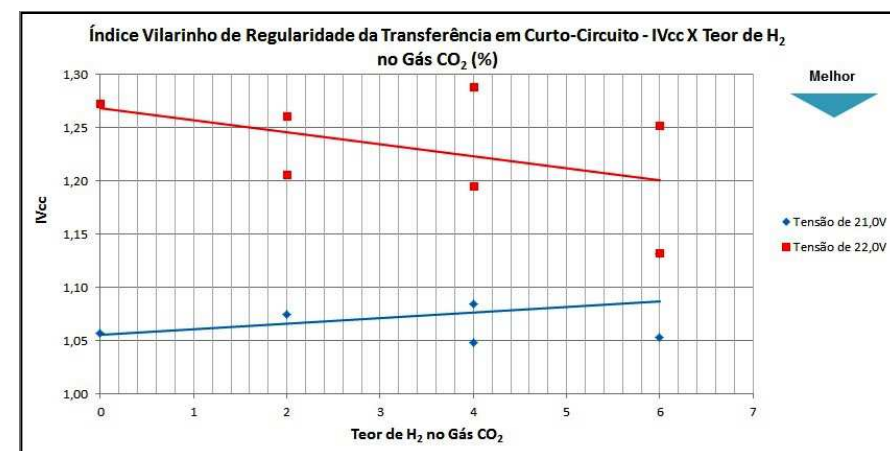
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.44 - Gráfico IVcc x Teor de H₂ no Gás (a) Ar, (b) Ar+10%CO₂, (c) Ar+25%CO₂ e (d) CO₂ para as tensões de 21,0 V e 22,0 V.

Pelos resultados de DPPC, DPAA, DPCC e IVcc as seguintes tendências foram observadas:

- Para as soldas com gases convencionais, a mistura Ar+25%CO₂ foi a que teve o arco mais estável, seguida de Ar+10%CO₂ e CO₂. Pelo índice IVcc, a soldagem com Ar+25%CO₂ também foi a mais estável e com Ar+10%CO₂ a mais instável.
- Pelos índices DPPC, DPAA e DPCC as soldas com arco mais estável foram, respectivamente, com os gases Ar+25%CO₂, CO₂+4% a 6%H₂ e Ar+25%CO₂+2% a 6%H₂.
- A adição de H₂ em gases com baixo potencial de oxidação provocou instabilidade do arco.
- A maioria das soldas com a tensão de 21,0 V foram as que produziram os arcos elétricos mais estáveis.
- A variação de 1,0 V provocou alteração significativa na estabilidade do processo, que foi mais sentido para Ar+25%CO₂ e CO₂, menos sentido por Ar e Ar+10%CO₂.

A estabilidade do processo de soldagem MIG-MAG por curto-circuito pode ser determinada pela estabilidade do arco, regularidade da transferência metálica e desempenho operacional do processo de soldagem. Existe uma relação muito acentuada entre os desvios padrão dos picos de corrente, do tempo de arco aberto e dos períodos de curto-circuito com a estabilidade do arco elétrico (Rezende et. Al., 2011).

Pelos resultados obtidos nesta etapa da pesquisa, o descrito na literatura (Scotti e Ponomarev, 2008; Tatagiba et al., 2012) foi comprovado, ou seja, os gases mais instáveis com a adição de H₂ foram o Ar puro e o Ar+10%CO₂ devido à dificuldade de emissão catódica necessária para a estabilidade do arco em soldagem MIG-MAG que possui um arame consumível. No caso do Ar foi por não possuir gás oxidante misturado a ele e no Ar+10%CO₂ foi pela redução do oxigênio, provocado pelo H₂, de maneira que o potencial de oxidação resultante não foi suficiente para manter a emissão catódica. Para o Ar+25%CO₂, a adição de H₂ provocou ligeira instabilidade arco. Já para o gás CO₂, a adição de H₂ reduziu o excesso do potencial de oxidação deste gás, melhorando todos os aspectos de estabilidade de arco.

Com estes resultados, para a próxima etapa da pesquisa foram escolhidos os gases Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂ e CO₂+4%H₂, pois foram os que tiveram melhor resultado nesta etapa. Quanto ao CO₂ com 4%H₂ foi uma escolha conservadora, visto que teor de até 6%H₂ produziram soldas adequadas.

5.2 Segunda etapa

O objetivo desta etapa foi avaliar a estabilidade do processo na soldagem MIG-MAG com as misturas selecionadas na primeira etapa: Ar+25%CO₂+2%H₂ e CO₂+4%H₂. Estas serão comparadas com os gases convencionais Ar+25%CO₂ e CO₂.

As mesmas análises efetuadas na etapa anterior foram utilizadas, acrescido dos seguintes detalhes:

- Avaliação da quantidade de respingos produzidos nas soldas;
- Execução de soldas com os gases propostos nas tensões de 18,0, 19,0 e 20,0 V.
- Excluída a análise pelo Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc), que foi considerada não relevante para este trabalho.

A finalidade destes ensaios foi comprovar por comparação com os gases convencionais Ar+25%CO₂ e CO₂, os efeitos da adição de H₂ na estabilidade do processo de soldagem.

A regulagem da velocidade do arame para as tensões indicadas nesta etapa também foi de acordo com a experiência do soldador. As tabelas 5.13 e 5.14 mostram os parâmetros de corrente, tensão e tempo de soldagem referente à primeira (21,0 e 22,0 V) e a segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V).

Tabela 5.13 – Corrente, tensão e tempo de soldagem referente à primeira (21,0 e 22,0 V) e a segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0V) das soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂.

Gás de proteção	Identificação da chapa	Tensão regulada na máquina (V)	Tensão média registrada no SAP (V)	Corrente regulada na máquina (A)	Corrente média registrada no SAP (A)	Tempo de soldagem (s)
Ar + 25% CO ₂	27	18,0	18,0	209,0	205,7	34,87
	6		18,2	209,0	210,7	36,41
	26	19,0	19,0	233,0	222,5	35,25
	4		19,1	215,0	216,3	35,24
	1	20,0	20,0	220,0	218,8	34,73
	2		20,1	226,0	227,7	36,13
	2.2	21,0	21,0	200,0	199,1	36,42
	2.4		21,0	202,0	199,2	35,90
	2	22,0	23,1	212,0	248,9	29,82
6.1	22,2		218,0	211,3	30,39	
Ar + 25% CO ₂ + 2% H ₂	17	18,0	18,4	207,0	209,2	34,41
	18		18,4	209,0	211,2	35,49
	15	19,0	18,8	213,0	212,6	34,70
	25		19,3	213,0	218,7	34,50
	13	20,0	20,5	221,0	223,3	34,34
	14		19,7	223,0	224,8	35,59
	7.2	21,0	21,2	196,0	199,3	34,00
	7.4		20,6	196,0	189,3	36,01
	7	22,0	22,7	233,0	245,9	30,89
7.5	21,5		235,0	228,9	30,88	

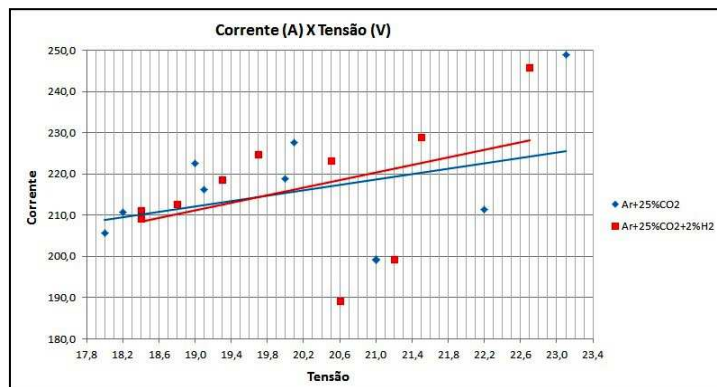
Tabela 5.14 - Corrente, tensão e tempo de soldagem referente à primeira (21,0 e 22,0 V) e a segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0V) das soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂.

Gás de proteção	Identificação da chapa	Tensão regulada na máquina (V)	Tensão média registrada no SAP (V)	Corrente regulada na máquina (A)	Corrente média registrada no SAP (A)	Tempo de soldagem (s)
CO ₂	11	18,0	18,6	194,0	198,2	40,33
	12		18,4	210,0	205,3	42,04
	9	19,0	19,9	194,0	204,8	40,82
	10		19,2	200,0	200,5	40,77
	7	20,0	20,6	199,0	198,5	40,04
	8		20,7	198,0	199,9	40,53
	3.1	21,0	22,6	167,0	170,6	39,30
	3.4	22,0	22,7	230,0	218,8	29,34
CO ₂ +4%H ₂	23	18,0	18,5	185,0	190,5	42,15
	24		18,6	186,0	188,1	41,61
	21	19,0	19,7	215,0	207,1	46,15
	22		19,7	200,0	208,8	41,66
	19	20,0	20,7	215,0	230,7	40,47
	20		20,7	213,0	215,8	42,85
	11	21,0	21,1	200,0	198,7	36,38
	11.3		21,0	201,0	197,4	36,17
	11.1	22,0	22,9	228,0	229,9	30,40
11.4	22,7		233,0	231,1	29,38	

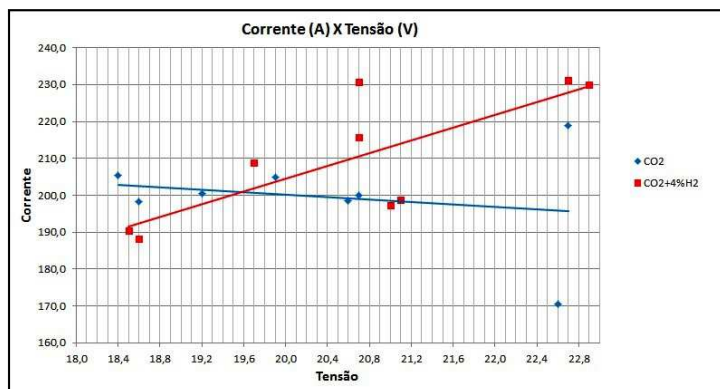
5.2.1 Avaliação do comportamento da tensão e corrente de soldagem com os gases de proteção propostos

A figura 5.45 mostra os gráficos de Corrente X Tensão com os dados das tabelas 5.13 e 5.14. As seguintes tendências foram observadas:

- A tensão média adquirida pelo sistema SAP foi aproximada a regulada na fonte de soldagem.
- Houve uma tendência do aumento da corrente de soldagem com o aumento da tensão para todos os gases utilizados, com exceção das soldas com o gás CO_2 que a corrente de soldagem diminuiu ligeiramente com o aumento de tensão.
- O comportamento foi similar ao ocorrido na primeira etapa.



a) Misturas $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$



b) Misturas CO_2 e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$

Figura 5.45 – Gráficos Corrente (A) X Tensão (V) das soldas com os gases propostos.

5.2.2 Soldagem com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$

5.2.2.1 Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos através de inspeção visual e por líquido penetrante

As figuras 5.46 e 5.47 mostram os cordões de solda com os gases de proteção e parâmetros de soldagem conforme tabelas 5.13 e 5.14, nas seguintes condições: após soldagem, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante. As seguintes tendências foram observadas:

- Todas as soldas apresentaram uma superfície de coloração clara, com poucos respingos e com alguma escória aderida à chapa. Visualmente, a quantidade de respingos e de escória das soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ pareceram menor que com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$.
- Todas foram aprovadas na inspeção visual e por líquido penetrante.

Estas indicações mostraram uma tendência de melhora do aspecto visual das soldas com o acréscimo de $2\%\text{H}_2$ no gás convencional $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$. Os cordões de solda avaliados por meio de visual de solda e líquido penetrante apresentaram aspectos muito parecidos e sem nenhuma descontinuidade superficial. Isto mostra que foi alcançado uma boa estabilidade do arco que proporcionou o controle da poça de fusão e atingiu uma boa aparência do cordão.

Misturas de gases para utilização em soldagem MIG-MAG podem influenciar positivamente na eficiência da proteção gasosa através da combinação das vantagens separadas dos gases participantes da mistura. Por exemplo, argônio adicionado ao CO_2 aumenta a estabilidade do arco, diminui a produção de respingos e melhora a qualidade superficial do cordão. Conforme as variáveis envolvidas, uma mudança no gás de proteção é suficiente para causar alterações no comportamento das soldas (Garcia e Scotti, 2011). Já a soldagem com CO_2 puro é considerada instável no que diz respeito ao arco elétrico e pela produção de mais respingos (Dutra, 2008). O hidrogênio como gás redutor, na mistura gasosa faz a limpeza dos óxidos superficiais e conseqüentemente produz um cordão de solda superficialmente mais brilhante (Scotti e Ponomarev, 2008).

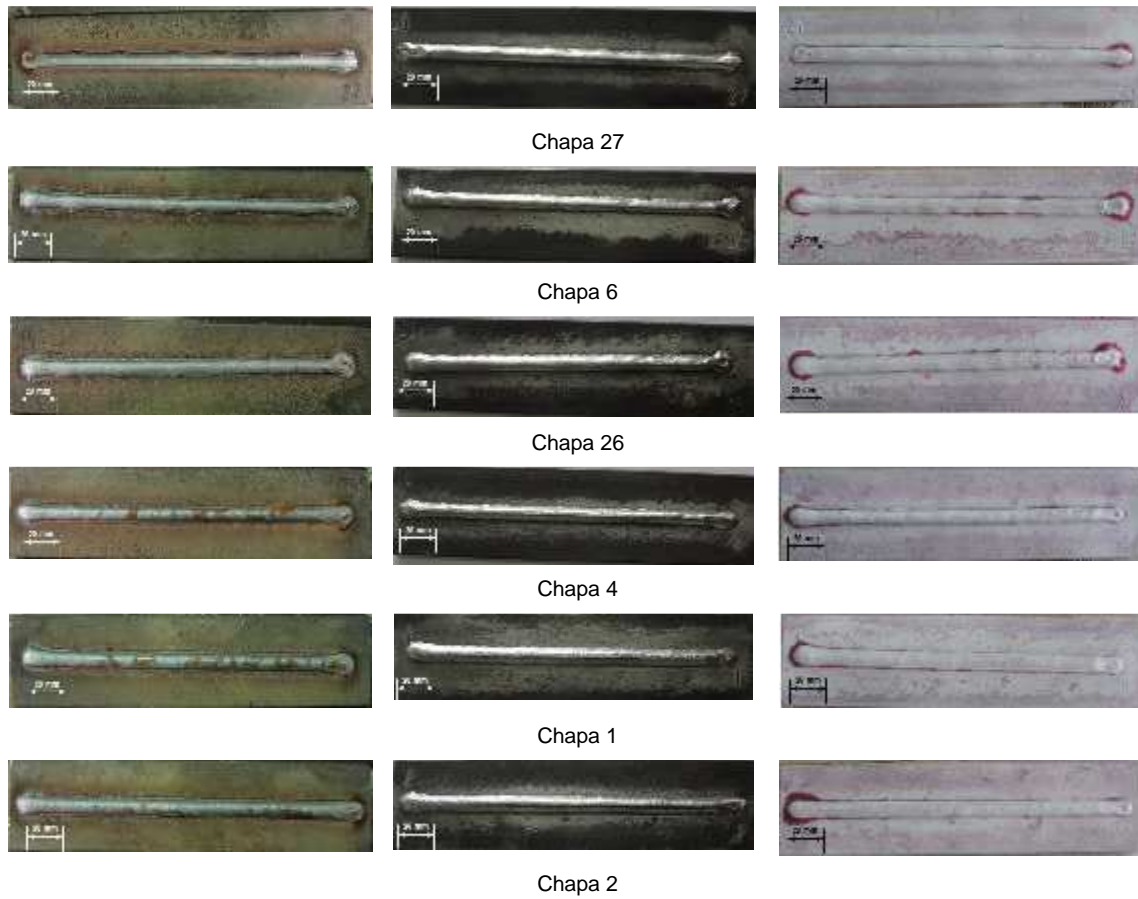


Figura 5.46 – Chapas 27, 6, 26, 4, 1 e 2 após soldagem com $Ar+25\%CO_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

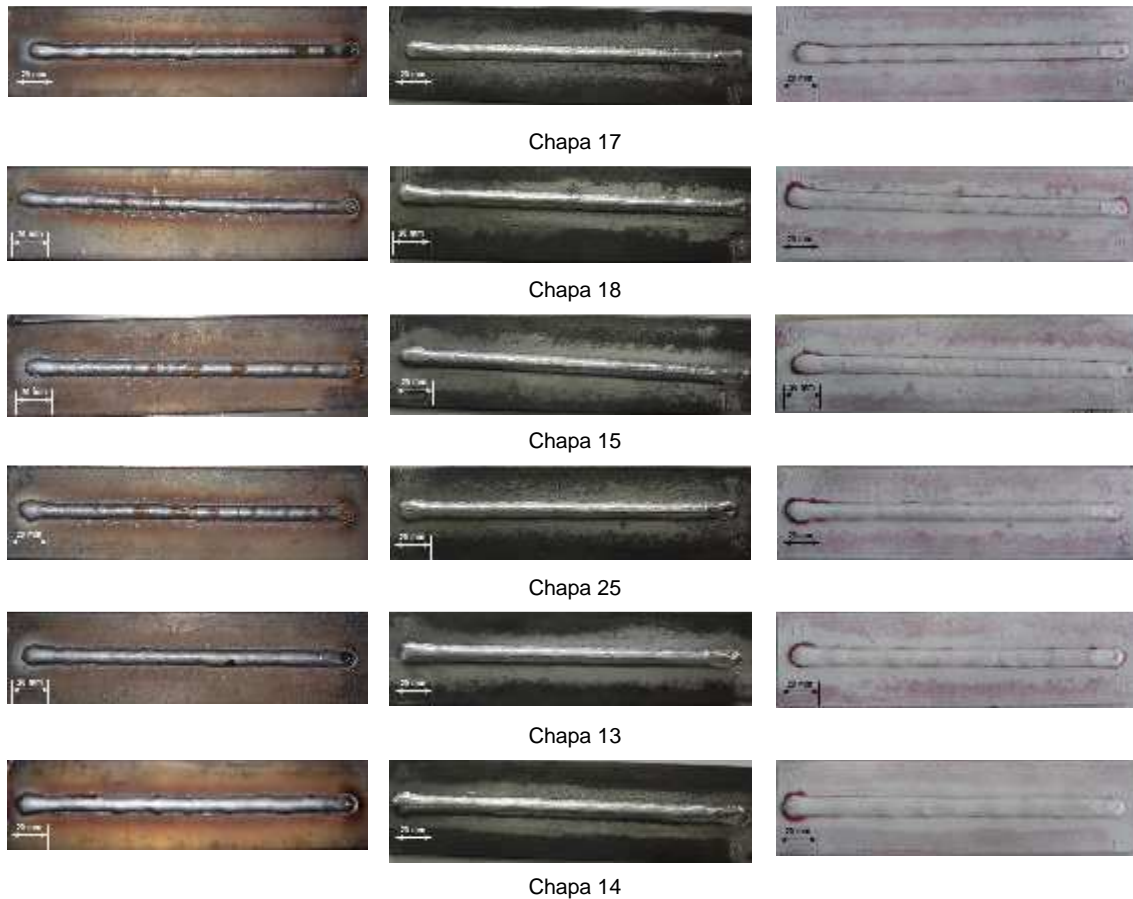


Figura 5.47 – Chapas 17, 18, 15, 25, 13 e 14 após soldagem com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

5.2.2.2 Análise da quantidade de respingos gerados durante a soldagem

A tabela 5.15 mostra a produção de respingos em função do tempo e os parâmetros de soldagem.

Tabela 5.15 – Produção de respingos e parâmetros de soldagem

Identificação da chapa	Tensão regulada na máquina (V)	Corrente média registrada no SAP (A)	Peso dos respingos (g)	Tempo de soldagem (min)	Produção de respingos (g/min)
Ar+25%CO₂					
27	18,0	205,7	0,2	1,18	0,2
6		210,7			
26	19,0	222,5	0,2	1,17	0,2
4		216,3			
1	20,0	218,8	0,1	1,19	0,1
2		227,7			
Ar+25%CO₂+2%H₂					
17	18,0	209,2	0,2	1,17	0,2
18		211,2			
15	19,0	212,6	0,1	1,15	0,1
25		218,7			
13	20,0	223,3	0,1	1,17	0,1
14		224,8			

Com os dados da tabela 5.15, foi elaborado o gráfico de Produção de Respingos x Tensão de Soldagem para os dois gases de proteção (figura 5.48). As seguintes tendências foram observadas no gráfico:

- Para as soldas com o gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, tensão de 19,0V a produção de respingos foi de 0,2 g/min. Com o gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, mesma tensão, a quantidade foi de 0,1 g/min, uma redução de 50%.
- Para as tensões de 18,0 V e 20,0 V, a quantidade de respingos foi à mesma para os dois gases, 0,2 g/min e 0,1 g/min, respectivamente.

Estes resultados mostraram indícios de que as soldas com o gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ na tensão de 19,0 V produziram menos respingos que com o gás convencional $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$. Porém a quantidade insuficiente de dados não oferece significância para se afirmar com segurança que a redução dos respingos foi por causa do H_2 presente na mistura gasosa. Fica como proposta para futuros trabalhos a coleta de uma quantidade maior de respingos na faixa operacional usada nesta etapa para uma análise mais apropriada.

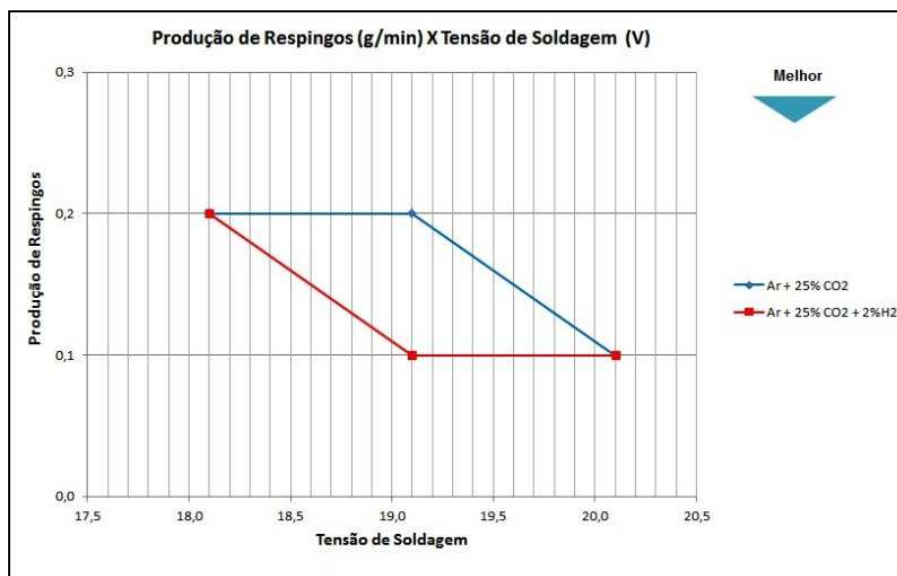


Figura 5.48 - Produção de respingos para as soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$.

5.2.2.3 Avaliação das macrografias, Índice de convexidade (IC) e penetração

As figuras 5.49 e 5.50 apresentam as macrografias dos cordões soldados nesta etapa com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$. A tabela 5.16 apresenta a altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração

e o Índice de convexidade (IC), das soldas executadas na primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V). As macrografias das soldas com estes gases não apresentaram descontinuidades na seção transversal.

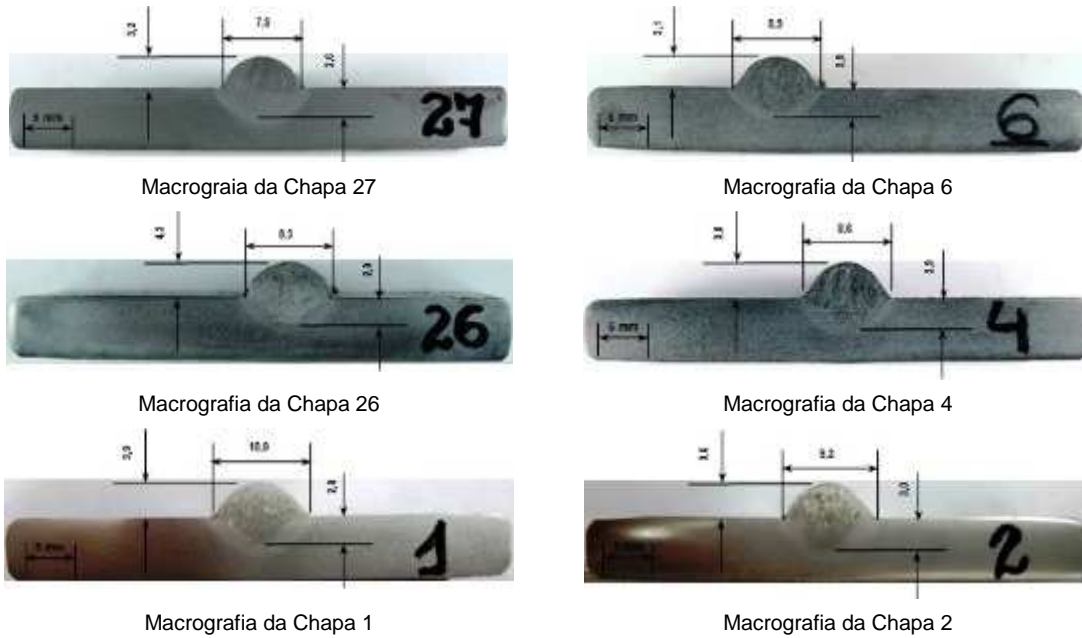


Figura 5.49 – Macrografias dos cordões soldados com Ar+25%CO₂.

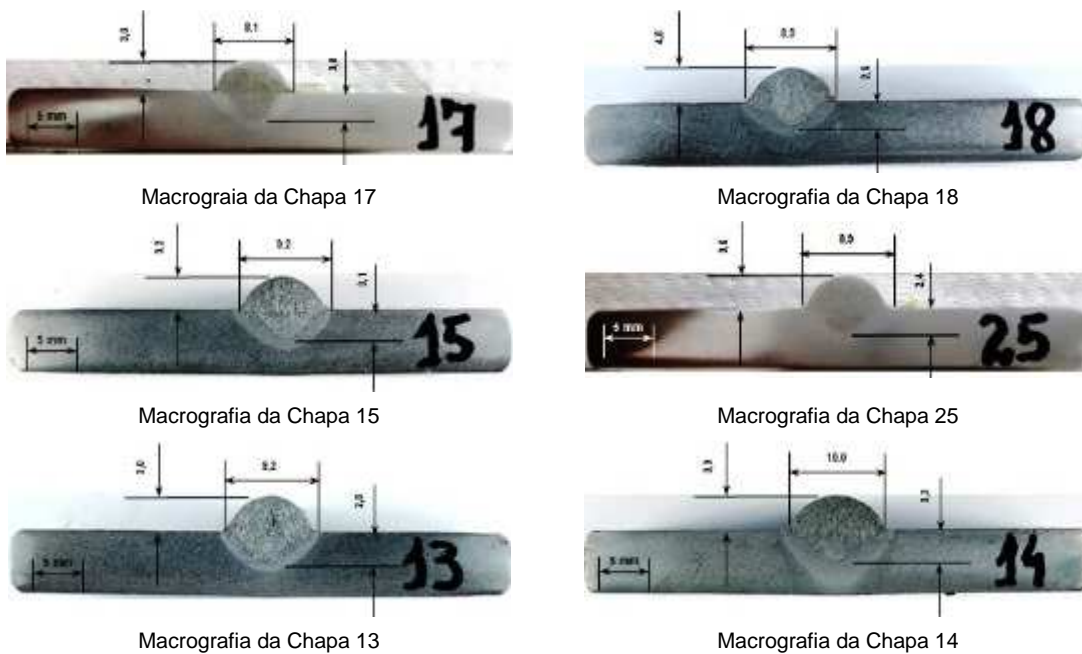


Figura 5.50 – Macrografias dos cordões soldados com Ar+25%CO₂+2%H₂.

Tabela 5.16 - Altura do reforço (r), largura do cordão (b), penetração e o Índice de Convexidade (IC) das soldas executadas na primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V) com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂.

Chapa	Valores medidos e calculados (A, mm, %)				
	Corrente média registrada no SAP (A)	Altura do reforço - r (mm)	Largura do cordão - b (mm)	Penetração (mm)	Índice de Convexidade - IC (%)
Ar+25%CO₂					
Tensão de 18,0V					
27	205,7	3,2	7,9	2,6	41
6	210,7	3,1	8,9	2,9	35
Tensão de 19,0V					
26	222,5	4,3	8,3	2,9	52
4	216,3	3,8	8,6	2,9	44
Tensão de 20,0V					
1	218,8	3,9	10,0	2,8	39
2	227,7	3,6	9,2	3,0	39
Tensão de 21,0V					
2.2	199,1	3,0	9,6	2,8	31
2.4	199,2	2,9	10,0	2,4	29
Tensão de 22,0V					
2	248,9	3,1	10,8	3,3	40
6.1	211,3	3,0	9,8	2,9	37
Ar+25%CO₂+2%H₂					
Tensão de 18,0V					
17	209,2	3,0	8,1	3,0	37
18	211,2	4,8	8,9	2,6	54
Tensão de 19,0V					
15	212,6	3,2	9,2	3,1	35
25	218,7	3,6	8,9	2,4	40
Tensão de 20,0V					
13	223,3	3,0	9,2	2,8	33
14	224,8	3,9	10,0	3,3	39
Tensão de 21,0V					
7.2	199,3	3,2	10,1	3,0	32
7.4	189,3	3,2	10,8	2,9	30
Tensão de 22,0V					
7	245,9	3,5	10,6	2,8	33
7.5	228,9	3,0	9,7	3,6	31

5.2.2.3.1 Índice de convexidade

A figura 5.51 mostra o gráfico Índice de Convexidade x Tensão de Soldagem, elaborados com os dados da tabela 5.16. Pelo gráfico foram observados os seguintes indicativos:

- Houve redução do IC com o aumento da tensão e corrente para as soldas com os dois gases de proteção. As soldas com Ar+25%CO₂+2%H₂ obtiveram valores de IC ligeiramente inferiores que as obtidas com a mistura Ar+25%CO₂.

Também houve indicativos de que o H_2 presente na mistura gasosa produziu cordões de solda com geometrias mais apropriadas que as obtidas pelo gás comercial sem H_2 . O aumento dos parâmetros de tensão e corrente diminuiu o valor de IC.

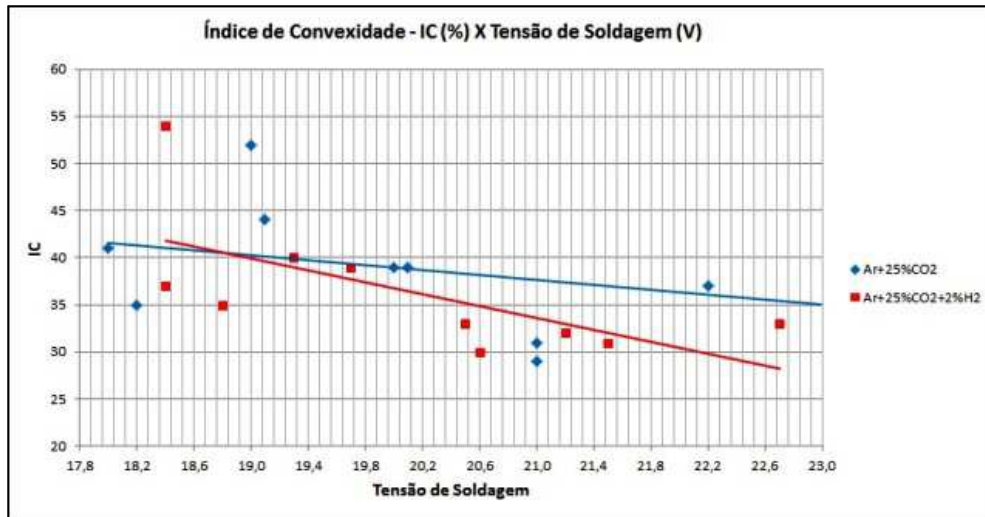


Figura 5.51 – Gráfico Índice de Convexidade X Tensão de Soldagem com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂.

5.2.2.3.2 Penetração

A figura 5.52 mostra o gráfico de Penetração X Tensão de Soldagem, elaborados com os dados da tabela 5.16.. As seguintes tendências podem ser observadas:

- A penetração aumentou com o aumento de tensão e corrente para os dois gases de proteção. As soldas com o gás de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ apresentaram maiores penetrações.

O aumento da penetração foi devido principalmente pelo aumento de tensão e corrente, e também houve indícios da influência do teor de 2%H₂ na mistura Ar+25%CO₂ neste aumento.

A diminuição de IC e aumento da penetração foram principalmente devido ao aumento de tensão e corrente de soldagem, mas também houve indicativos da participação do teor de 2%H₂ na mistura Ar+25%CO₂ nas variações destes parâmetros. Conforme Junior (2003), as características do arco, a transferência do metal, geometria do cordão, penetração, entre outras, são influenciados pelo gás de proteção, utilizado na soldagem MIG-MAG, e pela corrente de soldagem. O aumento da tensão de soldagem, para uma

corrente constante, provoca um aumento da largura do cordão e diminuição da altura do reforço, proporcionando uma distribuição do metal depositado regular.

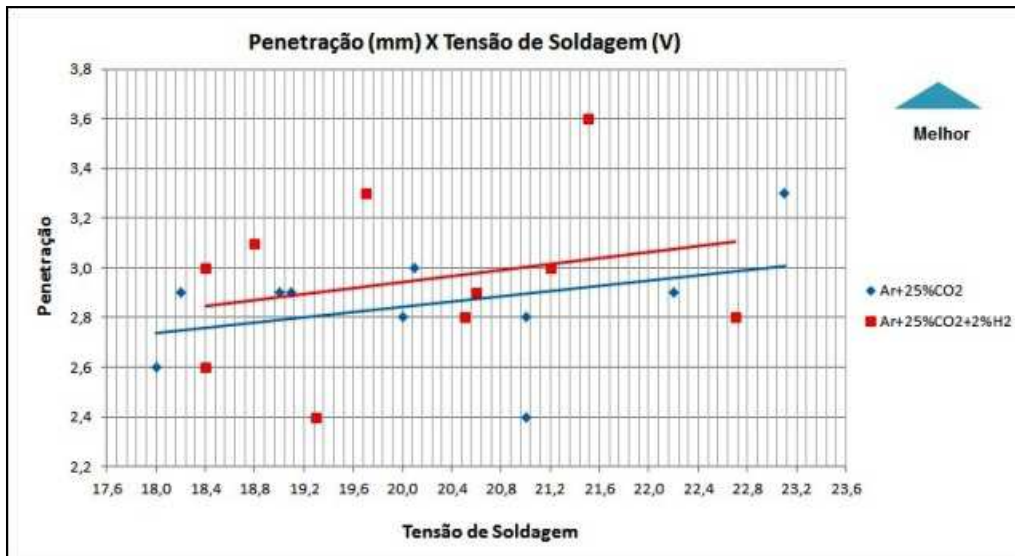


Figura 5.52 – Gráfico Penetração X Tensão de Soldagem com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂.

5.2.2.4 Análise da estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos

A tabela 5.17 mostra os valores de tensão e corrente de soldagem, assim como as medições de DPPC, DPAA e DPCC para os dois gases de proteção. Estes foram coletados pelo sistema SAP na primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V). Com os dados da tabela 5.17, foram elaborados gráficos para análise destes índices das soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂.

Tabela 5.17 - Tensão e corrente de soldagem, DPPC, DPAA e DPCC referentes à primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V).

Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	Desvio Padrão de Picos de Corrente - DPPC (A)	Desvio Padrão do Período de Arco Aberto – DPAA (ms)	Desvio Padrão do Período de Curto Circuito – DPCC (ms)
Ar+25%CO₂				
Tensão de 18,0V				
27	205,7	47,1	2,6	1,7
6	210,7	41,2	1,9	1,3
Tensão de 19,0V				
26	222,5	51,7	2,9	1,7
4	216,3	38,9	2,6	1,4
Tensão de 20,0V				
1	218,8	55,7	3,9	1,8
2	227,7	58,9	3,7	1,8
Tensão de 21,0V				
2.2	199,1	45,8	4,0	1,3
2.4	199,2	51,1	4,5	1,4
Tensão de 22,0V				
2	248,9	54,3	4,0	1,2
6.1	211,3	49,4	4,2	1,1
Ar+25%CO₂+2%H₂				
Tensão de 18,0V				
17	209,2	38,9	2,3	1,4
18	211,2	52,8	3,2	2,1
Tensão de 19,0V				
15	212,6	46,1	2,9	1,6
25	218,7	47,1	2,9	1,8
Tensão de 20,0V				
13	223,3	49,2	3,3	1,6
14	224,8	48,4	2,8	1,4
Tensão de 21,0V				
7.2	199,3	36,2	2,8	1,0
7.4	189,3	40,8	2,9	1,1
Tensão de 22,0V				
7	245,9	50,8	3,3	1,2
7.5	228,9	53,8	3,5	1,3

5.2.2.4.1 Desvio Padrão de Picos de Corrente (DPPC)

A figura 5.53 mostra o gráfico DPPC x Tensão de Soldagem, elaborado com os dados da tabela 5.17, das soldas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂. Foram observadas as seguintes tendências:

- Para as soldas com os dois gases houve a tendência de aumento do DPPC com o aumento da tensão de soldagem. Isto indica um aumento da instabilidade do arco elétrico.
- Entretanto, as soldas com a mistura Ar+25%CO₂+2%H₂ os valores de DPPC foram menores (arco mais estável) que para a mistura convencional Ar+25%CO₂ em praticamente toda a faixa de tensão e corrente testada.

- Para as soldas com o gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ o aumento do DPPC foi muito discreto tendendo a constante. Isto mostra indícios que a adição de H_2 no gás de proteção manteve a estabilidade do arco quase praticamente constante para toda a faixa de tensão e corrente testada.

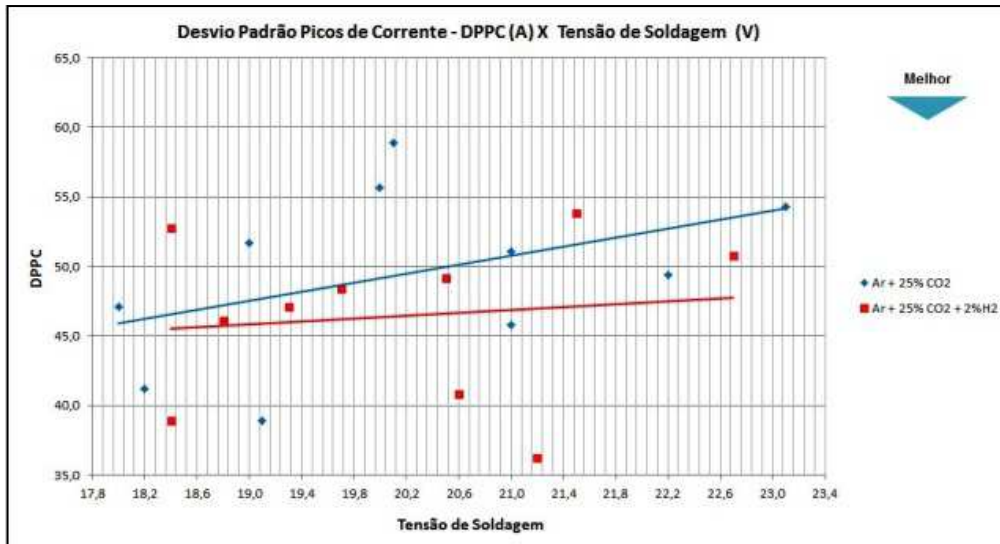


Figura 5.53 - Gráfico DPPC x Tensão de Soldagem com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$.

5.2.2.4.2 Desvio Padrão do Período de Arco Aberto (DPAA)

A figura 5.54 mostra o gráfico DPAA x Tensão de Soldagem, elaborado com os dados da tabela 5.17, das soldas realizadas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$. As seguintes tendências foram verificadas:

- O índice DPAA apresentou o mesmo comportamento que o DPPC, ou seja, aumentou com o acréscimo de tensão e corrente para as soldas com os dois gases.
- o DPAA foi menor para as soldas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ que para a mistura $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ praticamente em toda a faixa de tensão e corrente.
- Para as soldas com o gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, o aumento de DPAA foi menor do que para $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ em que o aumento do DPAA foi bem mais visível.
- O comportamento DPAA para os dois gases foi parecido com o do DPCC.

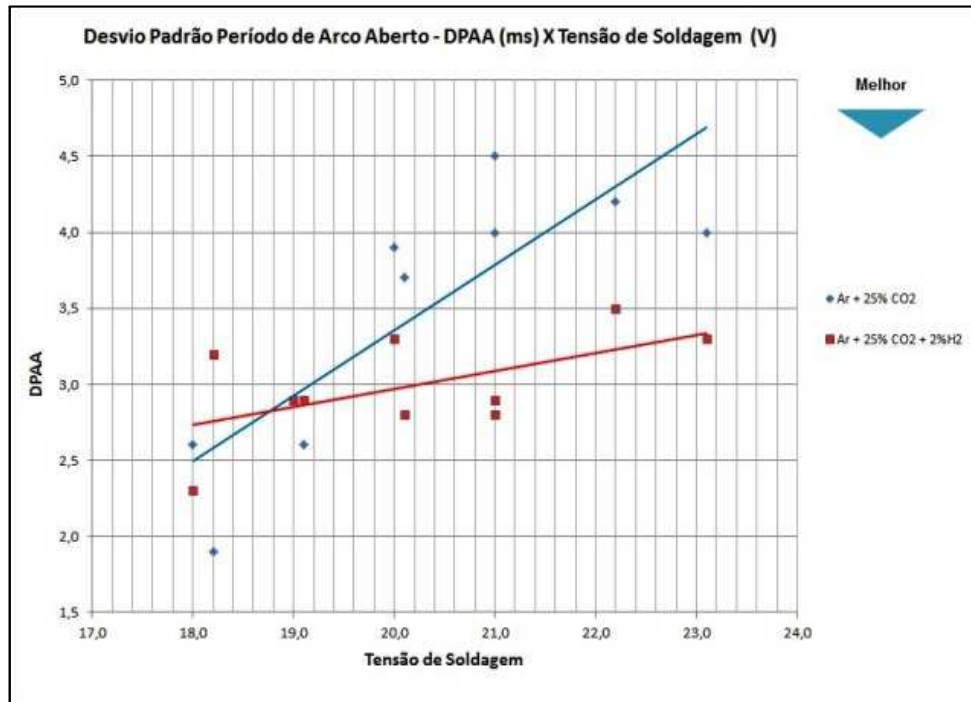


Figura 5.54 - Gráfico DPAA x Tensão de Soldagem com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂.

5.2.2.4.3 Desvio Padrão do Período de Curto Circuito (DPCC)

A figura 5.55 mostra o gráfico DPCC x Tensão de Soldagem, elaborado com os dados da tabela 5.17, das soldas realizadas com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂. As seguintes tendências foram verificadas:

- Para as soldas com os dois gases o DPCC reduziu com o aumento de tensão e corrente, ou seja, o arco ficou mais estável.
- O arco elétrico das soldas com Ar+25%CO₂+2%H₂ foi mais estável (menor DPCC) praticamente em toda a faixa de tensão e corrente.

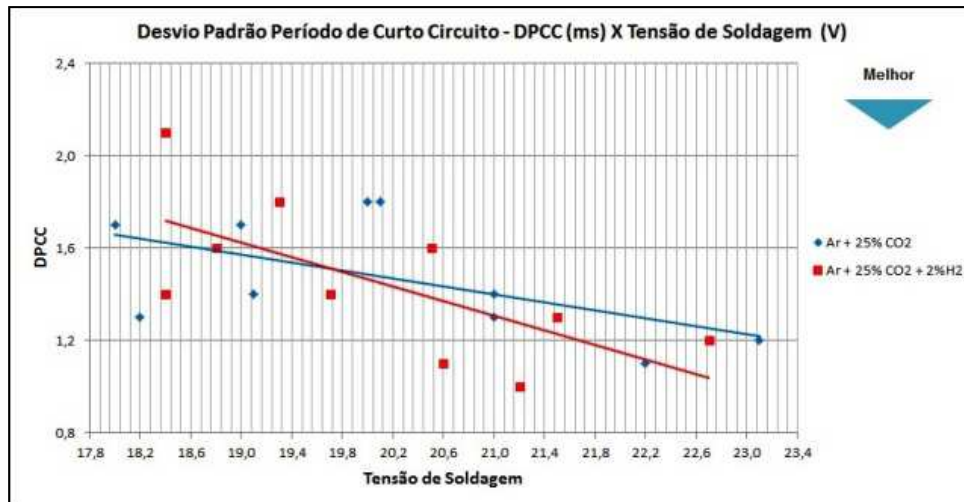


Figura 5.55 - Gráfico DPCC x Tensão de Soldagem com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂ referentes a primeira e segunda etapa do trabalho.

Os resultados obtidos com DPPC, DPAA e DPCC indicam melhor estabilidade do arco nas soldas com Ar+25%CO₂+2%H₂ para todas as tensões. Outra comprovação verificada por estes índices foi que a solda com este gás produziu uma maior resistência à diminuição da estabilidade com a variação de tensão e corrente. Os melhores resultados de estabilidade do arco elétrico foram com as tensões de soldagem entre 20,0V e 22,0V. Os desvios padrão dos picos de corrente, do tempo de arco aberto e dos períodos de curto circuito tem uma relação com a estabilidade do arco elétrico. Na soldagem MIG-MAG com transferência por curto circuito, foi confirmada a relação entre estes desvios padrão e a estabilidade do arco em soldas executadas com diferentes fontes de soldagem (Rezende et. Al., 2011).

5.2.3 Soldagem com os gases CO₂ e CO₂+4%H₂

5.2.3.1 Análise qualitativa dos cordões de solda produzidos através de inspeção visual e por líquido penetrante

As soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂, após soldagem, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante, são mostradas nas figuras 5.56 e 5.57. Os seguintes pontos foram observados:

- As soldas apresentaram logo após soldagem uma superfície de coloração clara, com respingos e regiões de escória sobre a chapa. Após limpeza para remoção de respingos e escórias, todas foram aprovadas no exame visual e por líquido penetrante.

- Comparando as soldas com os dois gases, não foram detectados diferenças significativas no aspecto visual, com exceção da quantidade de respingos e escórias nas soldas com $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ que foi aparentemente menor.
- A solda da chapa 21 com o gás $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$, apresentou um formato irregular e em análises posteriores mostraram grande instabilidade do arco. Por este motivo esta solda foi descartada para todas as avaliações propostas.

A menor da quantidade de respingos na soldagem com $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ pode ser devido à redução de óxidos superficiais pelo hidrogênio.

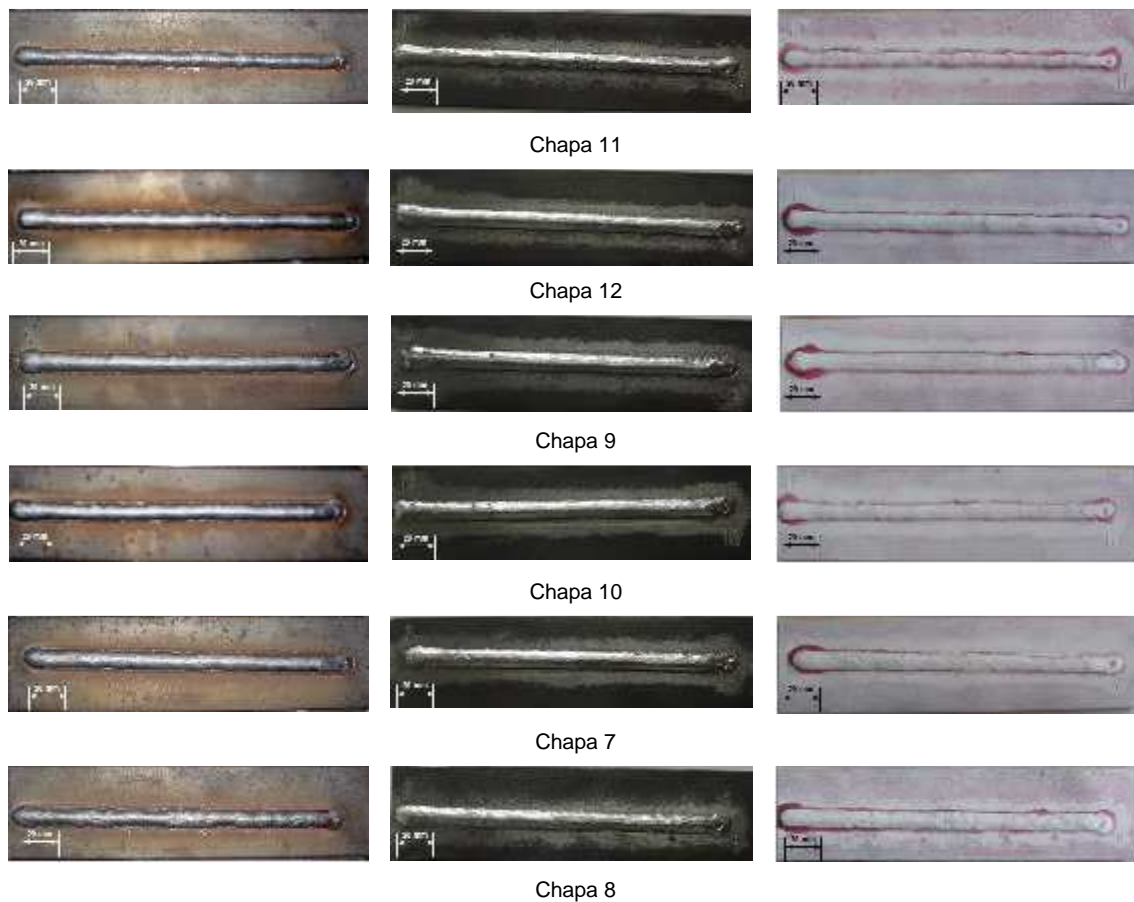


Figura 5.56 – Chapas 11, 12, 9, 10, 7 e 8 após soldagem com CO_2 , após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

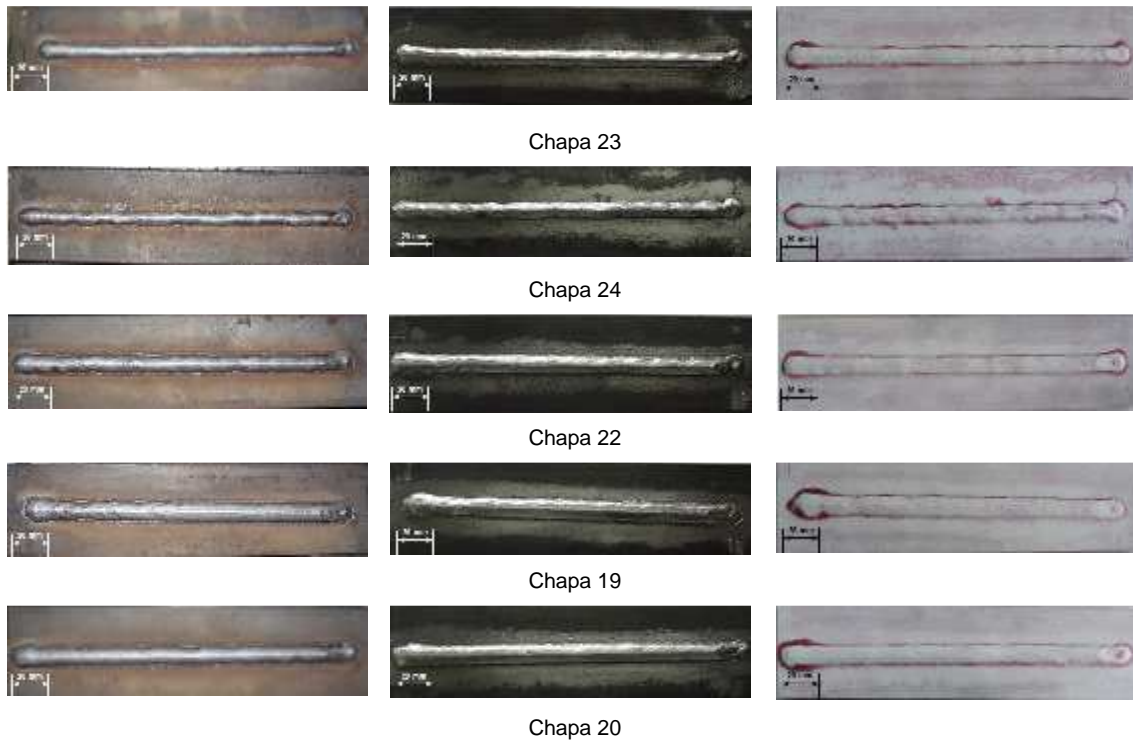


Figura 5.57 – Chapas 23, 24, 22, 19 e 20 após soldagem com $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$, após preparação para ensaio visual e após ensaio por líquido penetrante.

5.2.3.2 Análise da quantidade de respingos gerados e coletados durante a soldagem

A tabela 5.18 mostra a produção de respingos e os parâmetros de soldagem.

Tabela 5.18 - Produção de respingos e parâmetros de soldagem.

Identificação da chapa	Tensão regulada na máquina (V)	Corrente média registrada no SAP (A)	Peso dos respingos (g)	Tempo de soldagem (min)	Produção de respingos (g/min)
CO_2					
11	18,0	198,2	0,2	1,34	0,1
12		205,3			
9	19,0	204,8	0,3	1,36	0,2
10		200,5			
7	20,0	198,5	0,2	1,37	0,1
8		199,9			
$\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$					
23	18,0	190,5	0,2	1,39	0,1
24		188,1			
21	19,0	NA	NA	NA	NA
22		208,8			
19	20,0	230,7	0,3	1,40	0,2
20		215,8			

Na figura 5.58 é mostrado o gráfico de Produção de Respingos x Tensão de Soldagem com CO_2 e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$, elaborado com os dados da tabela 5.18. As seguintes tendências foram observadas no gráfico:

- A produção de respingos foi igual para os dois gases nas tensões de 18,0V e 20,0V.
- Para solda com o gás $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ na tensão de 19,0V a produção de respingos não foi calculada visto que a solda da chapa 21 foi descartada.

Como verificado nas soldas com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$, a quantidade insuficiente de dados não oferece significância para se afirmar com segurança que H_2 presente na mistura gasosa promoveu alguma variação na quantidade de respingos.

Fica como proposta para futuros trabalhos a coleta de uma quantidade maior de respingos na faixa operacional usada nesta etapa para uma análise mais apropriada.

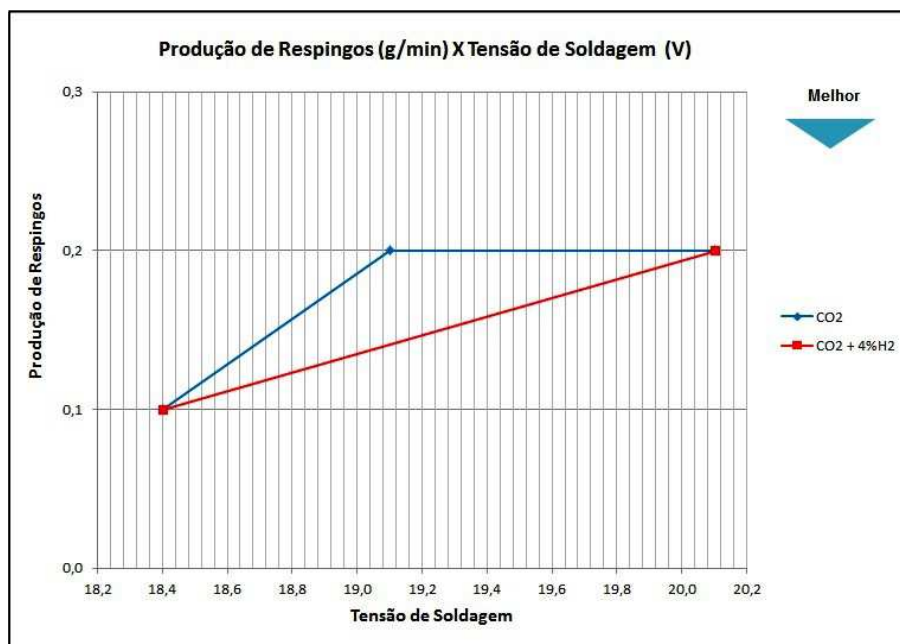


Figura 5.58 - Produção de respingos para as soldas com CO_2 e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$.

5.2.3.3 Avaliação das macrografias, Índice de convexidade (IC) e penetração

As figuras 5.59 e 5.60 mostram as macrografias dos cordões soldados nesta etapa com CO_2 e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$. A tabela 5.19 mostra a altura do reforço, largura do cordão, penetração e o Índice de convexidade (IC), das soldas

executadas na primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V). As macrografias das soldas com estes gases não apresentaram descontinuidades na seção transversal.

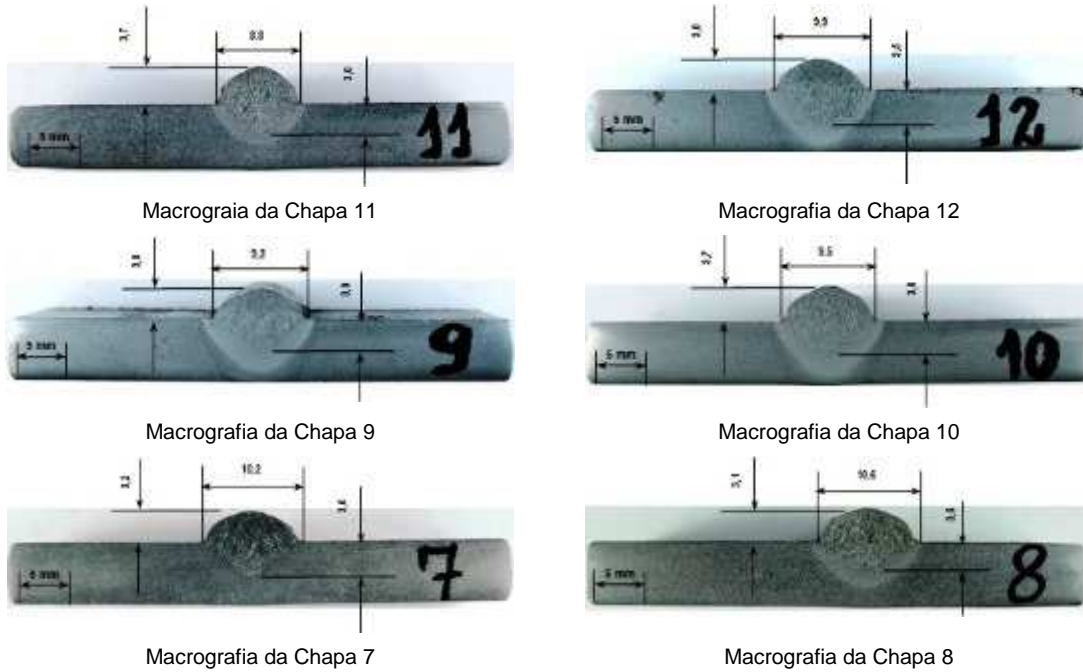


Figura 5.59 – Macrografias dos cordões soldados com CO₂.

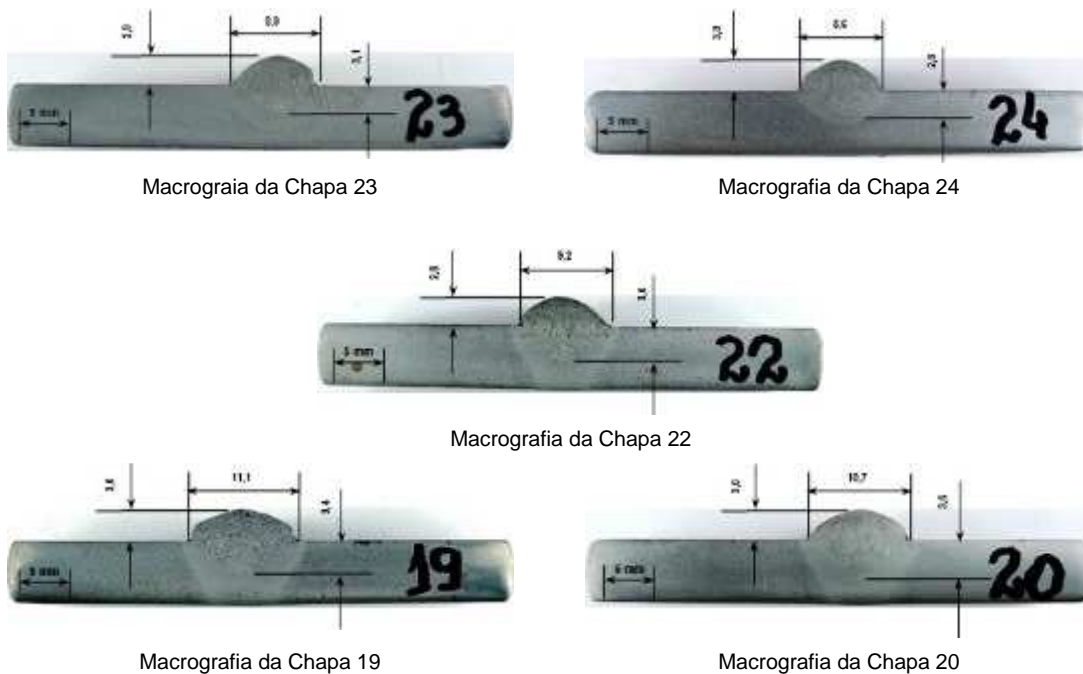


Figura 5.60 – Macrografias dos cordões soldados com CO₂+4%H₂.

Tabela 5.19 - Altura do reforço (r), a largura do cordão (b), penetração e Índice de convexidade (IC) das soldas executadas das soldas executadas na primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V) com os gases CO₂ e CO₂+4%H₂.

Chapa	Valores medidos e calculados (A, mm, %)				
	Corrente média registrada no SAP (A)	Altura do reforço - r (mm)	Largura do cordão - b (mm)	Penetração - P (mm)	Índice de Convexidade - IC (%)
CO₂					
Tensão de 18,0V					
11	198,2	3,7	8,8	3,0	42
12	205,3	3,0	9,9	3,5	30
Tensão de 19,0V					
09	204,8	3,0	9,2	3,0	33
10	200,5	3,7	9,5	3,0	39
Tensão de 20,0V					
07	198,5	3,2	10,2	3,6	31
08	199,9	3,1	10,6	3,5	29
Tensão de 21,0V					
3.1	170,6	2,9	9,5	2,6	31
Tensão de 22,0V					
3.4	218,8	3,1	10,0	3,9	31
CO₂+4%H₂					
Tensão de 18,0V					
23	190,5	2,9	8,9	3,1	33
24	188,1	3,0	8,6	2,8	35
Tensão de 19,0V					
22	208,8	2,8	9,2	3,6	30
Tensão de 20,0V					
19	230,7	3,0	11,1	3,4	27
20	215,8	3,0	10,7	3,7	28
Tensão de 21,0V					
11	198,7	3,1	9,6	3,4	32
11.3	197,4	2,8	10,0	2,9	28
Tensão de 22,0V					
11.1	229,9	2,8	9,9	3,9	28
11.4	231,1	3,1	9,3	3,8	33

5.2.3.3.1 Índice de convexidade (IC)

A figura 5.61 mostra o gráfico Índice de Convexidade X Tensão de Soldagem com os gases CO₂ e CO₂+4%H₂ elaborados com os dados da tabela 5.19. Pelo gráfico, foram observados os seguintes indicativos:

- Com o aumento da tensão houve a diminuição do IC para as soldas com os dois gases de proteção. Para as soldas com CO₂+4%H₂ os valores do IC foram inferiores aos da soldagem com CO₂ puro.

O aumento dos parâmetros de tensão e corrente bem como a presença de H₂ presente na mistura gasosa diminuiu o valor de IC. Também houve

indicativos da produção de cordões de solda com geometrias mais apropriadas que as obtidas pelo gás comercial CO₂ puro.

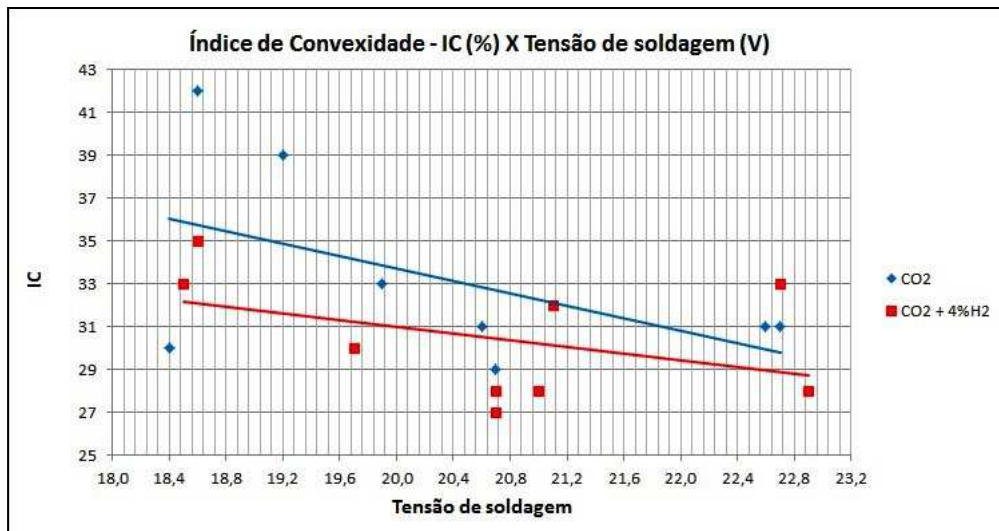


Figura 5.61 – Gráfico Índice de Convexidade X Tensão de Soldagem com CO₂ e CO₂+4%H₂.

5.2.3.3.2 Penetração

A figura 5.62 mostra o gráfico de Penetração X Tensão de Soldagem das soldas com os gases CO₂ e CO₂+4% elaborados com os dados da tabela 5.19. As seguintes tendências foram observadas:

- Com o aumento da tensão de soldagem a penetração aumentou para as soldas com os dois gases de proteção. A penetração da solda com o gás CO₂+4%H₂ foi discretamente maior que para a soldagem com CO₂ puro.

O aumento da penetração foi principalmente devido ao aumento de tensão e corrente, mas também houve participação do gás de proteção CO₂+4%H₂. Segundo Schwedersky (2011), o hidrogênio adicionado ao gás de proteção argônio, no processo TIG, provoca o aumento da eficiência de fusão do arco para uma mesma corrente média em comparação ao Ar puro. Este aumento na eficiência de fusão é resultado direto da contração da coluna do arco e do aumento da condutividade devido à adição de hidrogênio.

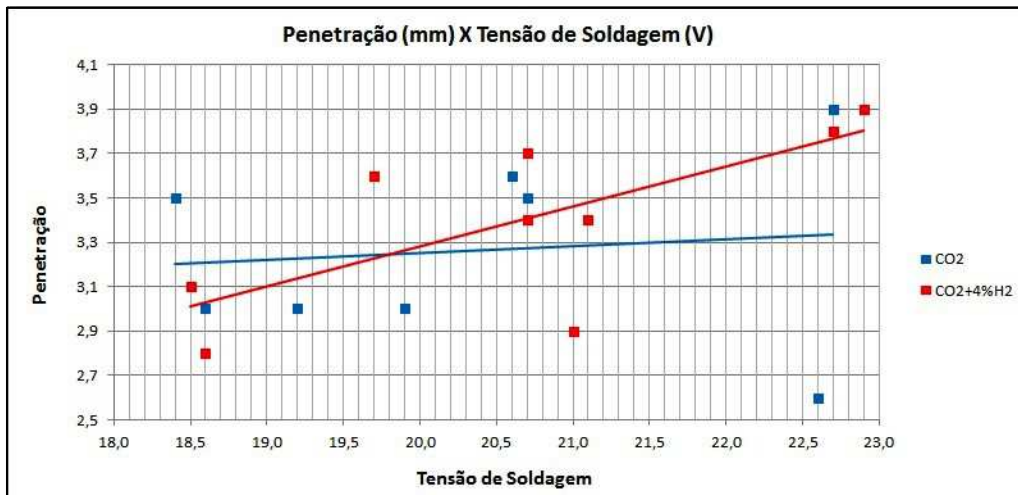


Figura 5.62 – Gráfico Penetração X Tensão de Soldagem com CO₂ e CO₂+4%H₂.

5.2.3.4 Análise da estabilidade do arco pela avaliação dos sinais elétricos

A tabela 5.20 mostra os valores de tensão e corrente de soldagem, assim como as medições de DPPC, DPAA e DPCC para os dois gases de proteção. Estes foram coletados pelo sistema SAP na primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V). Com os dados da tabela 5.19, foram elaborados gráficos para análise destes índices das soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂.

Tabela 5.20 - Tensão e corrente de soldagem, DPPC, DPAA e DPCC referentes a primeira (21,0 e 22,0 V) e segunda etapa (18,0, 19,0 e 20,0 V).

Chapa	Corrente média registrada no SAP (A)	Desvio Padrão de Picos de Corrente - DPPC (A)	Desvio Padrão do Período de Arco Aberto – DPAA (ms)	Desvio Padrão do Período de Curto Circuito – DPCC (ms)
CO₂				
Tensão de 18,0V				
11	198,2	76,5	4,5	3,0
12	205,3	70,0	3,0	2,3
Tensão de 19,0V				
09	204,8	61,4	2,9	1,8
10	200,5	64,9	3,0	2,1
Tensão de 20,0V				
07	198,5	56,8	3,7	1,6
08	199,9	60,6	4,2	2,0
Tensão de 21,0V				
3.1	170,6	81,2	8,1	2,7
Tensão de 22,0V				
3.4	218,8	62,9	4,5	1,5
CO₂+4%H₂				
Tensão de 18,0V				
23	190,5	66,1	2,9	2,2
24	188,1	77,8	4,7	3,0
Tensão de 19,0V				
22	208,8	73,5	3,7	2,0
Tensão de 20,0V				
19	230,7	73,2	4,0	2,3
20	215,8	63,9	3,3	1,8
Tensão de 21,0V				
11	198,7	54,0	3,7	1,7
11.3	197,4	55,7	3,6	2,9
Tensão de 22,0V				
11.1	229,9	61,0	3,9	1,4
11.4	231,1	63,5	3,9	1,6

5.2.3.4.1 Desvio Padrão de Picos de Corrente (DPPC)

A figura 5.63 mostra o gráfico DPPC x Tensão de Soldagem, elaborado com os dados da tabela 5.20, das soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂. Foram observadas as seguintes tendências:

- Para solda com o gás CO₂+4%H₂ o DPPC diminuiu (maior estabilidade) com o aumento de tensão e corrente. Para o CO₂ o DPPC permaneceu constante.
- Entretanto, as soldas com CO₂+4%H₂ os valores de DPPC foram menores (arco mais estável) que para o gás convencional CO₂ em praticamente toda a faixa de tensão e corrente testada.

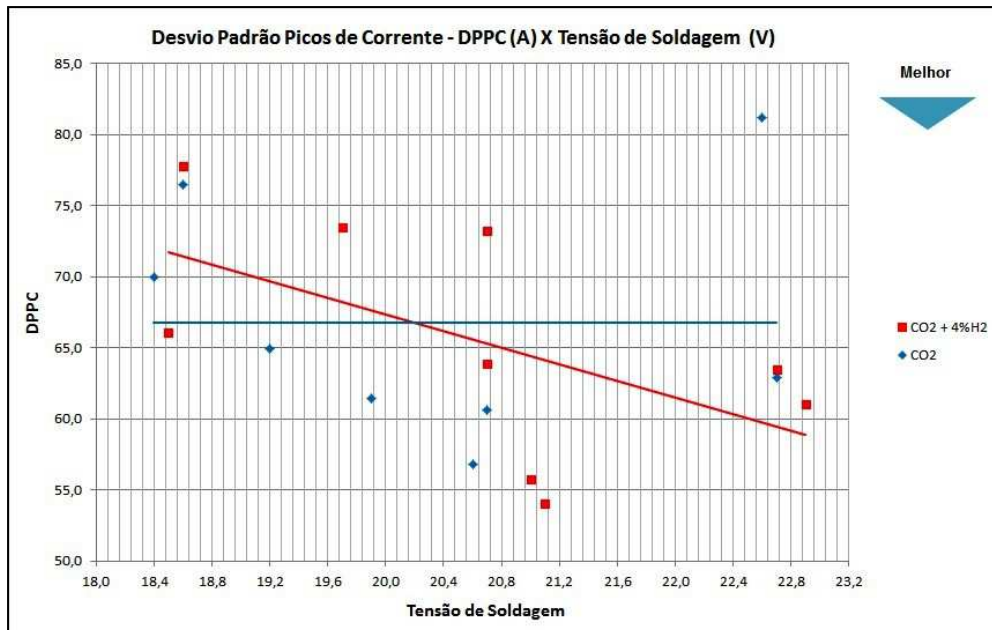


Figura 5.63 - Gráfico DPPC x Tensão de Soldagem com os gases CO₂ e CO₂+4%H₂ referentes à primeira e segunda etapa do trabalho.

5.2.3.4.2 Desvio Padrão do Período de Arco Aberto (DPAA)

A figura 5.64 mostra o gráfico DPAA x Tensão de Soldagem, elaborado com os dados da tabela 5.20, das soldas realizadas com CO₂ e CO₂+4%H₂. As seguintes tendências foram verificadas:

- As soldas com CO₂ puro mostram um aumento de instabilidade do arco com o aumento da tensão de soldagem.
- Para a soldagem com o gás CO₂+4%H₂ o DPAA permaneceu constante.
- Os menores valores de DPAA foram para as soldas com CO₂+4%H₂ praticamente em toda a faixa de tensão e corrente.

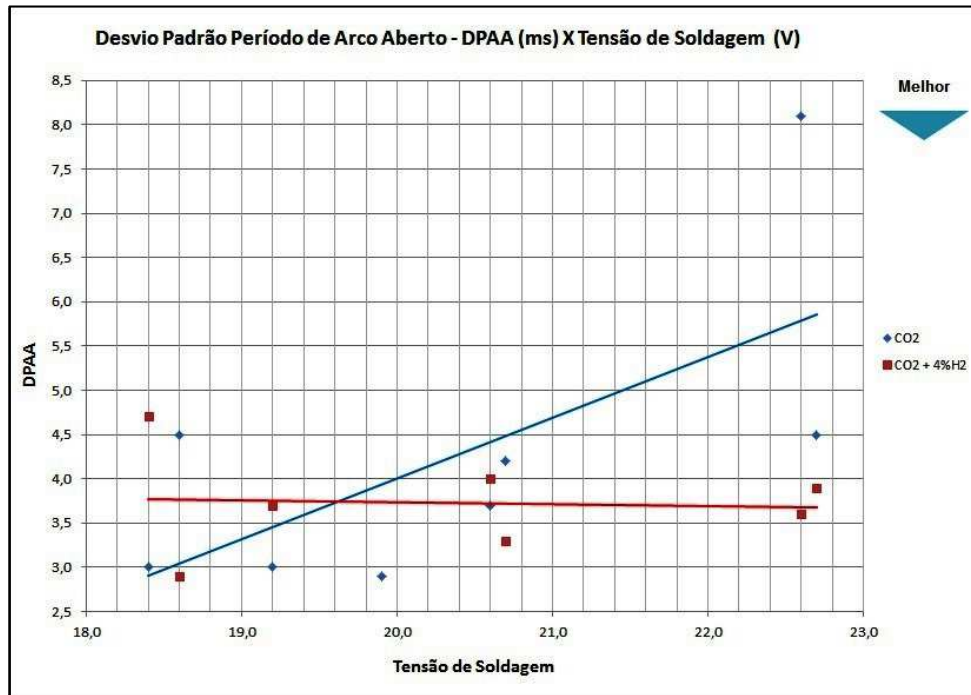


Figura 5.64 - Gráfico DPAA x Tensão de Soldagem com os gases CO₂ e CO₂+4%H₂ referentes à primeira e segunda etapa do trabalho.

5.2.3.4.3 Desvio Padrão do Período de Curto Circuito (DPCC)

A figura 5.65 mostra o gráfico DPCC x Tensão de Soldagem, elaborado com os dados da tabela 5.20, das soldas realizadas com CO₂ e CO₂+4%H₂. As seguintes tendências foram verificadas no gráfico:

- Para as soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂ o aumento da tensão e corrente diminuiu o DPCC.
- Para tensões acima de 20,0V a soldagem com CO₂+4%H₂ teve o arco mais estável (menor DPCC) praticamente em toda a faixa de tensão e corrente.

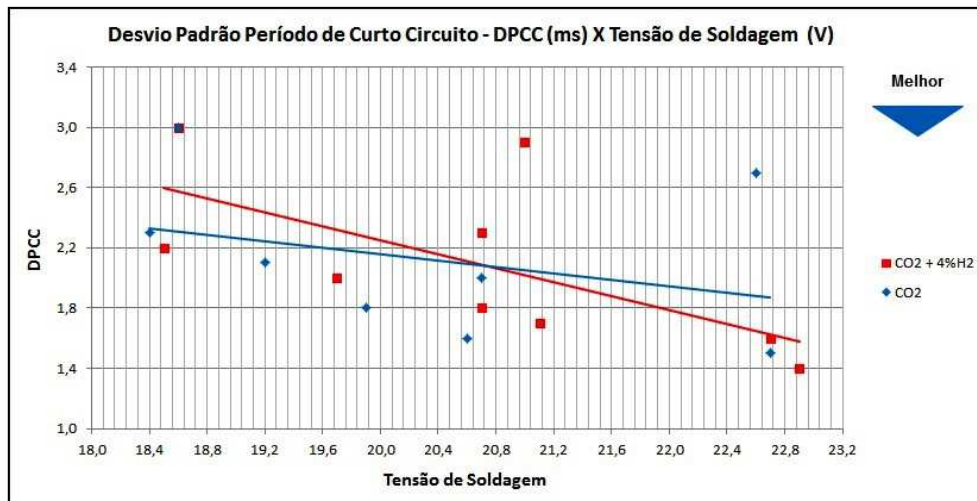


Figura 5.65 - Gráfico DPCC x Tensão de Soldagem com os gases CO₂ e CO₂+4%H₂ referentes à primeira e segunda etapa do trabalho.

Estes resultados sinalizam que o acréscimo de 4%H₂ no gás CO₂ aumentou a estabilidade do arco praticamente em toda a faixa de tensão e corrente. Isto foi verificado para todos os índices avaliados (DPCC, DPAA e DPCC). O aumento da estabilidade do arco elétrico devido à adição de H₂ nos gases de proteção Ar+25%CO₂ e CO₂, nas condições citadas anteriormente, tem como hipótese a redução do O₂ dissociado na coluna de plasma pelo H₂, e consequentemente redução do potencial de oxidação a um nível adequado. O comportamento operacional do processo de soldagem, a estabilidade do arco e regularidade da transferência metálica são os principais fatores que definem a estabilidade do processo MIG-MAG por curto circuito. Os desvios padrão dos picos de corrente, do tempo de arco aberto e dos períodos de curto circuito são os principais índices para a avaliação da estabilidade do arco elétrico. Na experiência mundial em soldagem MIG-MAG por curto-circuito, foi provada a relação entre estes desvios padrão e a estabilidade do arco em testes executados com diferentes fontes de soldagem (Rezende et. Al., 2011).

Pelas análises realizadas nesta etapa, foi observado que as soldas com os gases de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ e CO₂+4%H₂ obtiveram melhores resultados de estabilidade que com os gases comerciais Ar+25%CO₂ e CO₂, e que a escolha destes gases foi acertada tendo em vista os resultados apresentados.

5.3 Terceira etapa

A terceira etapa teve como objetivo a avaliação do metal de solda produzido com as misturas contendo H_2 , avaliadas na etapa anterior $Ar+25\%CO_2+2\%H_2$ e CO_2+4H_2 , em comparação com os gases convencionais $Ar+25\%CO_2$, CO_2 . Para tal, o metal depositado com estes gases foi avaliado por espectrometria de emissão ótica para determinação da composição química, por microscopia ótica para verificação da microestrutura, e avaliação da microdureza Vickers. A finalidade destes ensaios foi verificar se a adição de hidrogênio na mistura gasosa provocou alguma mudança na composição química, nas microestruturas e na dureza do metal de solda.

5.3.1 Análise química do metal de solda

A tabela 5.21 mostra a composição química do metal de solda depositado com os 4 (quatro) gases estudados, além da especificação da composição química do arame ER70S-6. Pode ser observado que:

- Os elementos Mn e Si tiveram concentrações abaixo do mínimo especificado para o arame ER70S-6 para o metal de solda depositado com os quatro gases de proteção utilizados. Isto ocorreu por que estes elementos desoxidantes foram consumidos nas reações com o oxigênio durante soldagem.
- O metal depositado com a mistura $Ar+25\%CO_2+2\%H_2$ obteve teor de Si e Mn cerca de 11 a 13% superior à mistura convencional $Ar+25\%CO_2$. Tal fato era esperado, devido ao menor potencial de oxidação da mistura contendo $2\%H_2$. Entretanto, esta diferença foi considerada como pouco significativa.
- O metal depositado com a mistura $CO_2+4\%H_2$ obteve teor de Mn e Si cerca de 9% inferior ao gás convencional CO_2 . Tal fato foi inesperado, devido ao menor potencial de oxidação da mistura contendo $4\%H_2$. Porém, esta diferença também foi considerada como pouco significativa.
- Os demais elementos químicos ficaram com teores dentro da faixa especificada para o arame ER70S-6 para todas as misturas gasosas utilizadas.

Os principais elementos desoxidantes presentes na composição química do arame ER70S-6 são o Mn e o Si. A diminuição da quantidade de Mn e Si pode ser devido à oxidação destes elementos na poça de fusão durante a soldagem com os gases $Ar+25\%CO_2$, $Ar+25\%CO_2+2\%H_2$, CO_2 e $CO_2+4\%H_2$.

Como o oxigênio na região do arco é importante para emissão de elétrons, para uma soldagem adequada com este arame o potencial de oxidação do gás de proteção deve ser adequado, pois se houver pouca quantidade de oxigênio na poça de fusão estes elementos desoxidantes vão para o cordão de solda como elementos de liga. Caso a quantidade de oxigênio seja suficiente, potencial de oxidação adequado, junto com os elementos desoxidantes produzirão escória que são facilmente removidas após resfriamento (Scotti e Ponomarev, 2008).

Com estes resultados, pode-se concluir que a adição de 2% H_2 no gás Ar+25% CO_2 e de 4% H_2 no gás CO_2 não provocou mudança significativa na composição química no metal de solda.

Tabela 5.21 – Composição química do metal de solda depositado com os gases Ar+25% CO_2 , Ar+25% CO_2 +2% H_2 , CO_2 e Ar+25% CO_2 +4% H_2 e especificação do arame ER70S-6.

Elemento	Concentração (%)				
	Ar+25% CO_2	Ar+25% CO_2 +2% H_2	CO_2	CO_2 +4% H_2	ER70S-6 *
C	0,0862	0,0752	0,0878	0,0782	0,06 a 0,15
Mn	1,0900	1,2100	1,1600	1,0500	1,40 a 1,85
Si	0,5950	0,6710	0,6310	0,5700	0,80 a 1,15
P	0,0219	0,0221	0,0242	0,0221	0,025
S	0,0107	0,0115	0,0203	0,0113	0,035
Ni	0,0105	0,0108	0,0062	0,0095	0,15
Cr	0,0232	0,0242	0,0317	0,0227	0,15
Mo	0,0059	0,0062	0,0058	0,0060	0,15
V	0,0027	0,0027	0,0031	0,0026	0,03
Cu	0,1390	0,1420	0,1420	0,1410	0,50
Ti	0,0016	0,0017	0,0020	0,0013	-
Zr	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	-
Al (Total)	0,0067	0,0064	0,0071	0,0062	-

* Valores únicos são máximos / Referência: ASME II Part C, 2013.

5.3.2 Microestrutura do metal de solda

O objetivo foi identificar de forma qualitativa e quantitativa os microconstituintes presentes no metal de solda obtido com os gases de proteção Ar+25%CO₂, CO₂ e com suas respectivas misturas com adição de H₂.

A figura 5.66 mostra as microestruturas do metal de solda depositado com os gases Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂ e CO₂+4%H₂.

Pode-se observar uma quantidade significativa de ferrita de contorno de grão - PF(G), ferrita com segunda fase alinhada - FS(A) e a ferrita com segunda fase não alinhada - (FS(NA). A Ferrita Acicular (FC) aparece em quantidade muito pequena comparando-se com os microconstituintes citados anteriormente. Não foi verificada a presença de Martensita (M) nem de agregado Ferrita-carbeto (AF). As microestruturas encontradas são semelhantes e típicas de metal de solda de aços ferríticos (Perdigão, 1987; Dolby, 1986; Fonseca et al., 1992; Silva et al., 2003; Araújo et al., 2006).

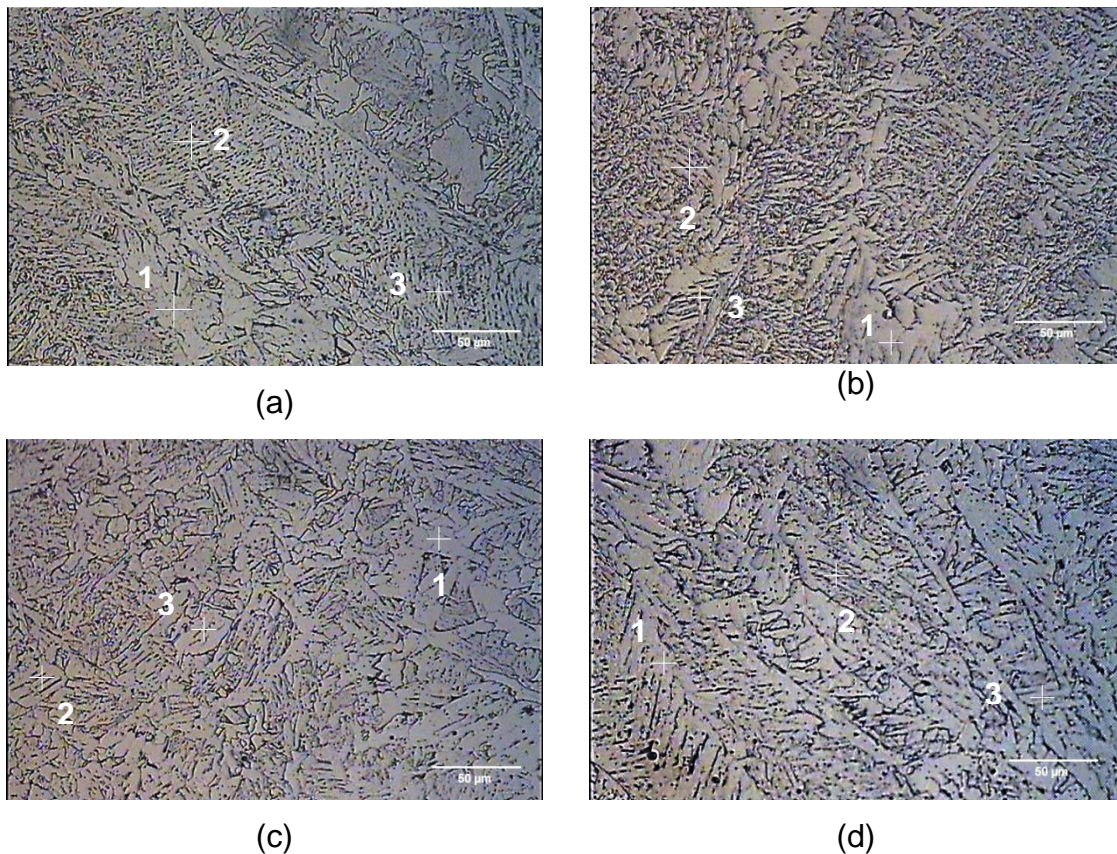


Figura 5.66 – Micrografias do metal de solda; (a) Ar+25%CO₂; (b) Ar+25%CO₂+2%H₂; (c) CO₂; (d) CO₂+4%H₂ - Legenda: 1- PF(G), 2- FS(A) e 3- FS(NA). Aumento de 200X.

A figura 5.67 mostra micrografias, em malhas de cem pontos, utilizadas para contagem em mil pontos dos constituintes presentes no metal de solda produzido com os gases Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂ e CO₂+4%H₂. A tabela 5.22 mostra o resultado desta contagem.

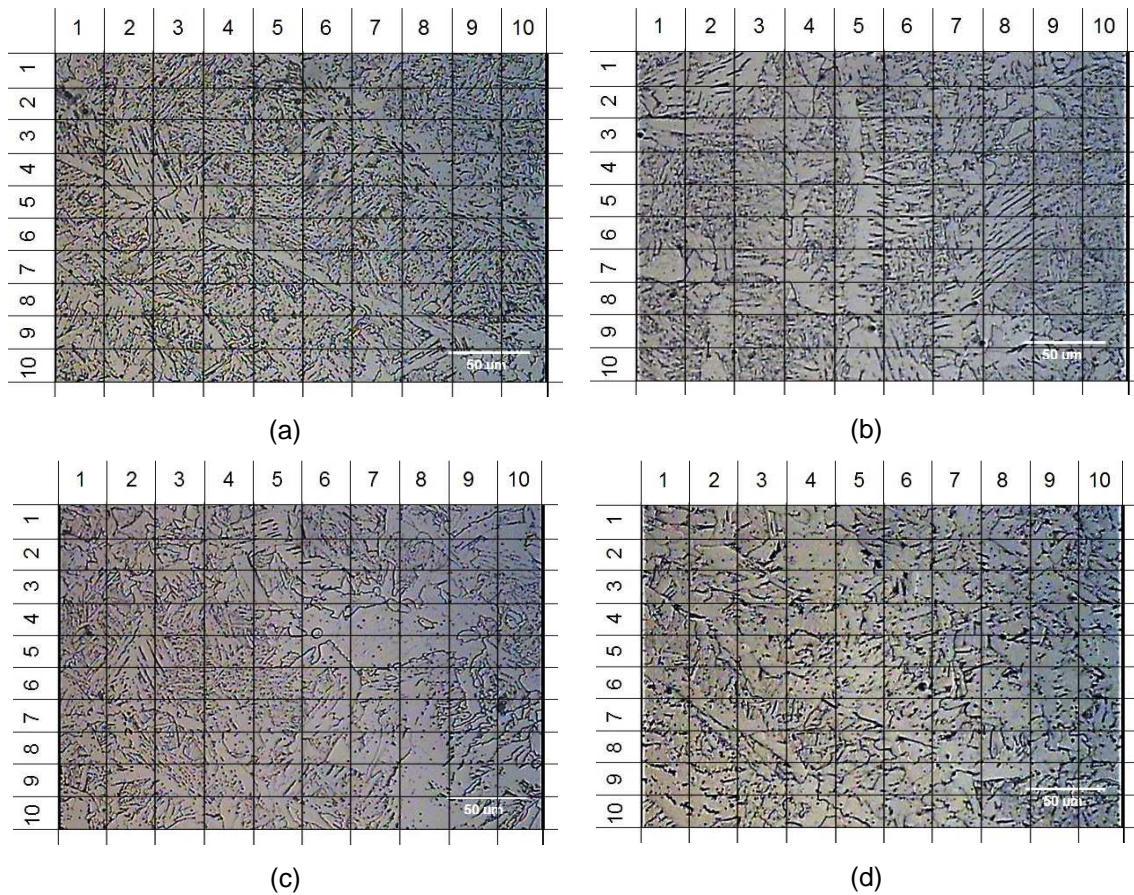


Figura 5.67 – Micrografias, em malhas de cem pontos, utilizadas para contagem em mil pontos dos constituintes presentes no metal de solda produzido com (a) Ar+25%CO₂; (b) Ar+25%CO₂+2%H₂; (c) CO₂; CO₂+4%H₂. Aumento de 200X.

Tabela 5.22 - Contagem dos constituintes encontrados no metal de solda obtido com os gases de proteção Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+2%H₂, CO₂ e CO₂+4%H₂.

Constituintes	Concentração (%)			
	Amostra 2 Gás Ar+25%CO ₂	Amostra 3 Gás Ar+25%CO ₂ +2%H ₂	Amostra 1 Gás CO ₂	Amostra 4 Gás CO ₂ +4%H ₂
PF(G)	47,9	52,5	62,5	61,1
FS(A)	27,3	20,4	16,2	19,8
FS(NA)	24,8	27,1	21,3	19,1

Os seguintes constituintes foram observados no metal de solda:

- A concentração dos constituintes encontrados no metal de solda produzido com Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂ foi aproximada.
- Para as soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂ as quantidades dos constituintes obtidos no metal de solda foram também aproximados.

Pelo explanado não houve diferenças significativas nas microestruturas encontradas no metal de solda obtido com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂. Este comportamento também foi observado no metal de solda produzido nas soldas com CO₂ e CO₂+4%H₂. Este fato se deve pelo maior aquecimento da coluna de plasma devido ao teor de CO₂ no gás de proteção, e conseqüentemente o calor na poça de fusão também aumenta. Na sequência há a diminuição do resfriamento global que tem com resultado formação de fases fora do equilíbrio (Ebrahimnia et. Al., 2009). Deste modo, se pode concluir que o teor de 2 e 4% nos gases comerciais Ar+25%CO₂ e CO₂, respectivamente, não afetou a microestrutura do metal de solda.

5.3.3 Microdureza Vickers

A tabela 5.23 mostra os 15 valores de microdureza Vickers (HV), medidos aleatoriamente, no metal de solda depositado com os gases de proteção Ar+25%CO₂, CO₂ e suas misturas com 2% e 4% de H₂ respectivamente. Pelos resultados encontrados de microdureza se pode observar que:

- A microdureza para o metal de solda depositado com os gases Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂ foi semelhante, com valores médios de 219 e 210 HV, respectivamente.

- Para o metal de solda depositado com CO₂ puro e CO₂+4%H₂ a microdureza também foi semelhante, valores médios de 216 HV e 202 HV, respectivamente.

Pela literatura a dureza do metal de solda aumenta quando se aumenta o teor de CO₂ no gás de proteção (Ebrahimnia et. Al., 2009). Isto não foi observado nos resultados obtidos, pois os valores de microdureza foram semelhantes para todas as amostras de metal de solda analisadas.

Tabela 5.23 - Valores de microdureza (HV) do metal de solda obtido da soldagem com os gases de proteção Ar+25%CO₂, CO₂ e suas misturas com 2% e 4%H₂.

Medições	Ar+25%CO ₂	Ar+25%CO ₂ +2%H ₂	CO ₂	CO ₂ +4%H ₂
	Microdureza (HV)			
1	213	210	200	181
2	209	223	214	197
3	220	214	208	185
4	195	193	184	212
5	237	209	207	220
6	217	193	228	217
7	215	223	226	214
8	210	230	216	205
9	224	204	251	203
10	235	200	220	196
11	237	206	211	181
12	212	208	220	203
13	226	215	202	228
14	213	221	235	199
15	221	206	213	192
Média (HV)	219	210	216	202

5.4 Considerações finais

A proteção gasosa em soldagem é de fundamental importância, pois protege a poça de fusão do ar atmosférico e facilita a condução de corrente elétrica e eletrônica devido à ionização do gás de proteção. As misturas

gasosas utilizadas, apesar de variarem bastante, há mais de trinta anos elas são à base de Ar, He, CO₂ e O₂. Há também aplicação moderada de H₂, o N₂ e o NO (óxido nítrico) em aplicações específicas. Ou seja, o desenvolvimento observado foi de gases de proteção com misturas ricas em gases inertes e adições em menor proporção de gases oxidantes. Em pesquisa de patentes e artigos científicos sobre o assunto, realizada por Tatagiba et al. (2012), pouca inovação foi observada no desenvolvimento de novas formulações de gases de proteção. A inovação verificada foi nos equipamentos de soldagem com capacidade de controlar a transferência metálica, que por intermédio da modulação do perfil da curva de corrente, a fonte de soldagem obtém uma transferência metálica mais uniforme, melhoria do aspecto do cordão e menos respingos, entre outros benefícios. Os processos MIG Pulsado, MIG Pulsado com Comando Sinérgico, MIG com pulsação térmica ou MIG Duplo Pulso, MIG com corrente alternada e MIG/MAG com curto-circuito controlado eletricamente e eletromecanicamente são exemplos destas inovações.

O presente trabalho, dividido 3 etapas de experimentos, mostrou na primeira etapa que é possível a soldagem do aço com baixo carbono, pelo processo MIG-MAG com transferência por curto-circuito, com utilização das misturas gasosas Ar, Ar+10%CO₂, Ar+25%CO₂ e CO₂ contendo H₂ com teor de no máximo 6%. Acima deste percentual houve o aparecimento de porosidade superficial verificada após avaliação qualitativa realizada por ensaio visual e por líquido penetrante. Foi também observada que nos gases convencionais com alto potencial de oxidação, a adição de H₂ promoveu benefícios a estabilidade do arco elétrico. Nesta etapa foram escolhidos os gases de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ e CO₂+4%H₂, pois foram os que tiveram melhores resultados de estabilidade em comparação aos outros gases utilizados. Na segunda etapa foi comprovado que a escolha destes gases foi correta, pois com eles foram obtidas as soldas mais estáveis em toda a faixa de corrente e tensão utilizada, isto quando comparado com as soldas com os gases convencionais Ar+25%CO₂ e CO₂. Esta melhoria da estabilidade foi maior na mistura gasosa CO₂+4%H₂, pois o CO₂ puro possui maior potencial de oxidação que a mistura Ar+25%CO₂. Na terceira etapa, as avaliações efetuadas no metal de solda depositado com os gases Ar+25%CO₂, CO₂ e suas respectivas misturas com 2% e 4% de H₂, demonstrou que não houve

diferenças significativas na composição química, na microestrutura e na microdureza das amostras analisadas.

O potencial de oxidação dos gases de proteção foi determinante para se alcançar a estabilidade da soldagem com a adição do H₂ na mistura gasosa. Isto pode ser explicado pela ação redutora do oxigênio dissociado na coluna de plasma pelo H₂, de modo que o potencial de oxidação atingiu valores mais adequados e a emissão catódica pode ser mantida durante toda a soldagem. Com isto, foi comprovada a propriedade da emissão catódica, característica do modelo oxidante, para soldagem de aço carbono, que é fundamental para se atingir a estabilidade adequada das soldas (Tatagiba et al., 2012; Scotti e Ponomarev, 2008).

Em relação aos critérios de avaliação da estabilidade do arco pelos sinais elétricos de corrente e tensão medidos durante a soldagem se mostrou um método eficaz. Os índices Desvio Padrão de Picos de Corrente (DPPC), Desvio Padrão do Período de Arco Aberto (DPAA), Desvio Padrão do Período de Curto Circuito (DPCC) e Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc), utilizados na pesquisa, comprovadamente são uma excelente ferramenta para avaliação da estabilidade do arco. Os principais fatores que definem a estabilidade do processo MIG-MAG por curto circuito são a regularidade da transferência metálica, a estabilidade do arco e o comportamento operacional do processo de soldagem. Os DPPC, DPAA, DPCC são os principais índices para a avaliação da estabilidade do arco elétrico, que na experiência mundial em soldagem MIG-MAG por curto-circuito, foi comprovada a relação destes desvios padrão e a estabilidade do arco em diferentes fontes de soldagem testadas (Rezende et. Al., 2011). O IVcc que na sua fórmula relaciona os índices DPAA e DPCC, apesar de seu potencial para avaliar a estabilidade do arco elétrico, não foi utilizado na segunda etapa. Em seu lugar foram usados os índices DPAA e DPCC separadamente. A eficácia da metodologia de avaliação de estabilidade por meio de sinais elétricos foi também comprovada nesse trabalho.

Em relação à avaliação das macrografias pelo Índice de Convexidade (IC) e penetração, na primeira etapa mostrou que a melhoria destes parâmetros foi devida exclusivamente ao aumento de corrente e tensão. De acordo com Moreira (2008), na soldagem MIG-MAG, mantendo-se todas as

variáveis de soldagem constantes, um aumento na corrente de soldagem provoca o aumento da penetração e da largura do cordão de solda. Na segunda etapa, melhoria do IC e da penetração foi também principalmente devido ao aumento da corrente e da tensão, porém houve indícios de que a adição de 2% H_2 na mistura gasosa Ar+25% CO_2 e 4% H_2 no CO_2 puro melhorou o formato do cordão de solda e aumentou a penetração. A influência do H_2 no gás de proteção na melhoria do IC e da penetração não pode ser comprovada quantitativamente devido ao número insuficiente de experimentos executados.

Quanto à geração de respingos e formação de escória residual, na avaliação quantitativa, cuja quantidade de soldas foi insuficiente, também não foi possível comprovar se a adição de H_2 nas misturas Ar+25% CO_2 e CO_2 provocou alguma diminuição dos respingos. Conforme Silva et Al. (2008), a soldagem que produz uma quantidade mínima de respingos, transferência metálica regular, cordão de solda homogêneo, sem atrapalhar o conforto do soldador e não provoquem tempos de trabalhos secundários excessivos se pode considerar como estável. Apesar da metodologia adotada não ter sido eficiente para trazer resultados quantitativos dos respingos gerados, a avaliação qualitativa mostrou indícios de redução de respingos e escórias nas soldas com gases de proteção contendo H_2 . Isto pode ser devido à melhoria da estabilidade do arco comprovada pela análise dos sinais elétricos de corrente e tensão.

Sobre o risco potencial do H_2 mencionado na literatura em promover trincas a frio, porosidades (Suban et. Al., 2001), este trabalho mostrou que é possível a soldagem de aço com baixo carbono, com os gases de proteção Ar+25% CO_2 +2% H_2 e CO_2 +4% H_2 . Isto direciona o uso destas misturas gasosas em aplicações industriais onde são utilizados aços de baixo carbono que não formam microestruturas frágeis com as variações bruscas de temperatura, característica do processo de soldagem. Como o H_2 provoca uma maior penetração da solda e a superfície do cordão de solda se apresenta limpa e sem óxidos (Suban et. Al., 2001) em conjunto com a melhoria na estabilidade do arco, nestas aplicações industriais serão produzidas soldas com menos escórias e respingos e conseqüentemente menos serviços de limpeza após a soldagem, promovendo assim o aumento da produtividade.

O uso da adição de H₂ neste trabalho com os possíveis benefícios mencionados pode ser ampliado para a avaliação de outros gases redutores, como por exemplo, os gases combustíveis ou hidrocarbonetos em misturas com Ar e CO₂. Em altas temperaturas e na presença de oxigênio, estes gases reagem provocando a dissociação produzindo CO₂ e H₂. Com a presença de H₂ na coluna de plasma é de se esperar as mesmas reações e resultados, verificados neste trabalho, sejam alcançados em soldagem de aço com baixo carbono.

6 CONCLUSÕES

No estudo aqui realizado sobre o efeito da adição do gás redutor H_2 nas misturas gasosas convencionais usadas na soldagem MIG-MAG do aço carbono, foi possível chegar às seguintes conclusões sobre a estabilidade do processo.

- Adição de H_2 igual ou superior a 8% nos gases convencionais Ar, Ar+10% CO_2 , Ar+25% CO_2 e CO_2 , produz excesso de porosidade superficial, não sendo recomendada a soldagem.

- É possível soldar o aço carbono com gases de proteção contendo H_2 sem descontinuidades superficiais nas seguintes concentrações: Ar com no máximo 6% de H_2 ; Ar+10% CO_2 com no máximo 4% de H_2 ; Ar+25% CO_2 com no máximo 2% de H_2 ; CO_2 puro com no máximo 6% de H_2 .

- A adição de 2% H_2 no Ar+25% CO_2 e 4% H_2 no CO_2 produziram soldas com igual ou melhor estabilidade do processo que estes gases comerciais sem adição de H_2 .

- É possível a adição de H_2 em gases com significativo potencial de oxidação.

- Em relação à geração de respingos, foi observado visualmente que a adição de 2% H_2 na mistura Ar+25% CO_2 e 4% H_2 ao CO_2 reduziu a quantidade de respingos. Porém, não foi possível comprovar esta tendência de forma quantitativa, devido à imprecisão e quantidade insuficiente de dados.

- A adição de 2% H_2 no Ar+25% CO_2 e 4% H_2 no CO_2 produziu uma ligeira tendência à diminuição do IC e aumento da penetração em toda faixa de tensão e corrente testada.

- A adição de 2% H_2 na mistura Ar+25% CO_2 produziu uma ligeira tendência de melhoria na estabilidade do arco elétrico em toda a faixa de tensão e corrente estudada.

- A adição de 4% H_2 no gás CO_2 produziu uma forte tendência de melhoria na estabilidade do arco elétrico em toda a faixa de tensão e corrente estudada.
- A adição de 2% H_2 na mistura $Ar+25\%CO_2$ e de 4% H_2 no CO_2 manteve ou melhorou a estabilidade do processo em toda a de tensão e corrente utilizada.
- A adição de 2% H_2 na mistura $Ar+25\%CO_2$ e de 4% H_2 no CO_2 não apresentou mudanças significativas na composição química do metal depositado, na microestrutura e na microdureza do metal de solda.
- Os resultados mostram que é possível a utilização de gases redutores em misturas gasosas oxidantes para soldagem de aço com baixo teor de carbono, particularmente aqueles imunes à tempera.
- Foi comprovada a teoria do modelo oxidante na soldagem do aço carbono pelo processo MIG-MAG por curto-circuito. Ainda, que a adição controlada de H_2 em misturas oxidantes reduz o potencial de oxidação a um nível tal que há a melhora da estabilidade do processo de soldagem.

7 SUGESTÕES

Sugestões para futuras pesquisas:

Utilização de outros gases redutores como, por exemplo, gases combustíveis ou hidrocarbonetos que quando submetidos a altas temperaturas e em presença de oxigênio, reagem como se fosse uma combustão onde o oxigênio presente dissocia as moléculas do gás produzindo CO_2 e H_2 .

Avaliação com metodologia mais adequada para determinar de forma quantitativa o efeito da adição do gás redutor na geração de respingos e de escória produzida.

Avaliação das misturas $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ em outras posições de soldagem e em chanfros.

Avaliação de aplicações no mercado, identificando setores e linhas de produção na indústria que possam utilizar misturas oxidantes com adição de gás redutor sem o risco de fissuração a frio, para usufruir dos benefícios comprovados nesta pesquisa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABS. (2013). Revista da Soldagem; <http://www.abs-soldagem.org.br/centraladm/docs/revistas/Ensino.pdf> em 10/11/2013 página mantida pela ABS.
- Abson, D. J. (1989) Non-metallic inclusions in ferritic steel weld metals – a review. *Welding in the World*, v. 27, n. 3-4.
- ASM Handbook. (1993). Volume 6 – Welding, Brazing, and Soldering. ASM International. United States of America.
- Atkins, P.W. e Jones, L. (1997) *Chemistry – Molecules, matter and change*. 3th ed. New York: W.H. Freeman.
- AWS A5.32M, (2011). *Welding Consumables – Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes* 2nd ed. AMERICAN WELDING SOCIETY.
- AWS. *Welding Handbook: Welding Processes* (1991). AMERICAN WELDING SOCIETY, v.2. 8 Ed. Miami, FL. 955 p.
- Babu, S. S. (2004) The mechanism of acicular ferrite in weld deposits. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, v. 8, p. 267-278.
- Bicknell, A. C.; Patchett, B. M., (1985). GMA Welding of Aluminum with Argon/Freon Shielding Gas Mixtures. *Welding Journal*, 64(5): 21-27.
- Bingul, Z.; Cook G. E., 2006, A real time prediction model of electrode extension for MIG-MAG, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 11, n. 1, July.
- Biskup, L. et al. 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.
- Breyemeier R.T. Oxy-argon gas-shielded metal-arc welding. *Int. Cl. 219 – 74*. US 3,253,113. 25 nov. 1964, 24 maio 1966.
- Chang, Y.H., (2006). Improve GMAW and GTAW with Alternating Shield Gases. *Welding Journal*, 85 (2): 41-43.
- Córner, F (2012) Gases combustíveis; <ftp://ftp.fem.unicamp.br/pub/IM338/Gases%20Combust%Edveis.pdf> em 01/07/2012 página mantida pela UNICAMP.
- Correia, J.V.O.; Costa, J.F.M. Shielding gas mixture for MIG brazing. *Int. C.I. B23K 1/00; B23K 35/37*. US 6,570,127 B2. 3 maio 2001, 27 maio 2003.
- 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 (1): 42-51.
- Dalpiaz, G.; Machado, I.G. (1999) Efeito do Hélio em gases de proteção com Ar-CO₂ e Ar-O₂ na soldagem MAG com corrente pulsada. *Soldagem & Inspeção*, 5 (8): 7-16.

Dennis, J.H. et al., (2002). Control of Exposure to Hexavalent Chromium and Ozone in Gas Metal in Gas Metal Arc Welding of Stainless Steels by Use of a Secondary Shield Gas. *The Annals of Occupational Hygiene*, 46(1): 43-48.

Dolby, R.E., 1986, Guidelines For Classification Of Ferritic Steel Weld Metal Microstructural Constituents Using The Light Microscope, *Welding In The World*, Vol. 24, No 7/8, Pp. 144-148.

Duboz, G.; Demars, P. Protective atmosphere for the arc welding and surfacing of steels. Int. Cl. HO 5b 11/00. US 3,470,346. 23 maio 1966, 30 set. 1969.

Ebrahimnia M., Goodarzi M., Nouri M., Sheikhi M., (2009). Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding. *Materials and Design*, 30: 3891–3895.

ESAB. (2005). Apostila Soldagem MIG-MAG; <http://www.esab.com.br/por/Instrucao/biblioteca/Apostilas.cfm> em 21/06/2011 página mantida pela Esab.

Evans, J.R., Colvin, E. D. (1990). Gás Metal Arc Welding and Shielding Gas Therefor. United States Patent. 6 p.

Evans, J.R; Colvin, E.D. Gas metal arc welding and shielding gas therefor. Int. Cl. B23K 9/173. 14 fev. 1990, 27 nov. 1990.

Ferraresi, V. A., Filho, D. F., Madeira, R. P., Balsamo, P. S. S. Influência do Gás de Proteção na Soldagem com Arames de Aços Inoxidáveis Ferríticos; http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos//downloads/inox08/pg_219-226.pdf em 03/07/2012 página mantida pela Nucleoinox.

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; <http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/021008077.pdf> em 11/05/2015 página mantida pela ABCM.

Filho, D. F., Ferraresi, V. A. (2007) Influência do Gás de Proteção na Microestrutura do Metal de Solda do Aço Inoxidável Ferrítico. 17º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Minas Gerais: FEMEC/UFU, 10 p.

Fonseca, A.S.M., Almeida, A.L.S., Rios, P.R., 1992, Análise Comparativa Ponto a Ponto da Quantificação da Microestrutura do Metal de Solda Segundo o Método do IIW, In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 18, P. 513 – 522, Anais.

Fortain, J.M. et al. Process for the MIG welding of aluminum and its alloys with a shielding gas of the Ar/He/O₂ type. Int. C.I B23K 9/173. US 2002/0036186 A1. 22 jun. 2000, 28 mar. 2002.

Fortes C (2005). Metalurgia da soldagem; http://www.esab.com.br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_ApostilaSoldagemMIGMAG.pdf em: 01/07/2012 página mantida pela Esab.

Galantino, C.; Viri, D.P.; VIRI, M.D. Pulsed arc welding method, apparatus and shielding gas composition. Int. Cl. B23K9/16. US 4,749,841. 2 fev. 1987, 7 jun. 1988.

Garcia, S. P., Scotti, A. (2011) Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG-MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular). Soldagem e Inspeção, São Paulo, 16(2): 146-155.

Gault, J. T., Taylor, R. B. (2001). Universal Shielding Gas for MIG-MAG and FCAW Process. United States Patent. 6 p.

Gault, J.T. Universal shielding gas for GMAW and FCAW welding and process. Int. Cl. B23K 9/173. US 6,303,891 B1. 28 out. 1999, 16 out. 2001.

Gülença, B., Develib, K., Kahramanc, N., Durgutlua, 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.

Heiple, R.C.; Burgardt, P., (1985). Effects of SO₂ shielding gas additions on GTA weld shape. Welding Journal Research Supplement, 64(6): 159s-162s.

Hermans, M. J. M., Ouden, G. D., (1999), Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding – The stability of the short circuit gas metal arc welding process is directly related to weld pool oscillations, Welding Research Supplement, p. 137-141.

Hilton, D.E. Shielding gas for electric arc welding. Int. C.I. B23K 9/00; B23K 35/38. US 4,626,646. 30 nov. 1983, 2 dez. 1986.

Hoback, G.L.; Meyers, J.L. Shielding gas mixture for welding superalloys. Int. Cl. B23K 9/16. US 5,083,002. 10 jan. 1991, 21 jan 1992.

Huang, H.Y., (2009). Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments. Materials and Design, 30: 2404-2409.

IMC Soldagem (2005). SAP V 4.01 – Manual do Sistema. Florianópolis – SC.

Irving, B., (1999). Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding. Welding Journal, 78(1): 37-41.

Jardim, W. F.; Canela, M. C. (2004) Fundamentos da oxidação química no tratamento de efluentes e remediação de solos. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Instituto de Química – IQ, Laboratório de Química Ambiental – LQA. Caderno Temático, Vol 1, Campinas.

Júnior, L. P. N. (2003). Otimização de um processo de solda MIG-MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Itajubá – MG, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 111 p.

Kim, S.T. et al., (2011). Effects of solution heat-treatment and nitrogen in shielding gas on the resistance to pitting corrosion of hyper duplex stainless steel welds. *Corrosion Science*, 53: 1939-1947.

Kin, Y. S.; Eagar, T. W., (1993), Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Welding Research Supplement*, p. 269-278.

Kooistra, L.F. Metallic Arc Welding With Stabilized Inert Gas Shielding. Int. Cl. 219-74. US 2,932,721. 14 fev. 1952, 12 abr. 1960.

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

Lesnewich, A., (1958), Control of melting rate and metal transfer, parts I & II. *Welding Journal*, p. 343-353s e 418-425.

Lin, Z. et al. (2007). Influence of Nitrogen and Heat Input on Weld Metal of Gas Tungsten Arc Welded High Nitrogen Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 14(5) Supplement 1: 259-262.

Linnert, G. E. (1994) *Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels. V.1 – Fundamentals*, 4 Ed. Miami, Florida, USA. AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS), 940 p.

Lobato, M. M., Neto, N. A. S. (2003). Desenvolvimento de um misturador de gases de soldagem e do programa ROTO BR. Projeto de fim de curso (Engenharia Mecânica) – Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 81p.

Lyttle, K. A.; Stapon, W. F. G. (1990) Select the Best Shielding Gas Blend for the Application. *Welding Journal*. V. 69, n. 11, p. 21 – 27.

Macêdo, W. A; Correia, V. O. Gas Composition For Arc Welding. Int. Cl. B23K 9/173. US 7,071,438 B2. 7 Mar. 2003, 4 jul. 2006.

Machado, I. G. *Soldagem & Técnicas Conexas: Processos*. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. 477 p.

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

Marques, P. V.; Modenesi, P. J.; Valente, O. B. (1998) Características do Arco de Soldagem TIG em Diferentes Atmosferas. IN: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM, 24, 1998, Fortaleza. Anais... Fortaleza: Associação Brasileira de Soldagem.

Mathews, H.H. ARC WELDING. Int. Cl. 219-74. US 3,089,944. 6 nov. 1959, 14 maio de 1963.

Modenesi, P. J. (2001). Descontinuidades; <http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/descontinuidades.pdf> em: 01/07/2012.

Modenesi, P. J. (2008). Terminologia; <http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/terminologia.pdf> em: 01/07/2012.

Moreira, A. F., Gallego, J., Tokimatsu, R. C., Yamakami, W. J. (2006); caracterização do Metal de Solda Obtido com Arame Sólido AWS E70S-6 em Função da Adição de CO₂ no Gás de Proteção. Anais do 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR., CBECIMat, p. 5518 a 5527

Moreira, A. F. (2008). Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem MIG-MAG e FCAW. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Ilha Solteira – SP, Faculdade de Engenharia – UNESP, 146 p.

Moreira, H. S. (2008). Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – São Paulo – SP, Escola Politécnica – USP, 84 p.

Moyer, N., (2002). The evolution of shielding gas. *Welding Journal*, 76: 51-52.

Musardo, G.B, Araújo, M.R.V, Yamakami, W.J., Ventrella, V.A., Gallego, J. (2005), Recuperação de turbinas hidráulicas cavitadas por deposição de revestimentos à base de cobalto – aspectos microestruturais. 60º Congresso da ABM. Belo Horizonte – MG.

Neff, J.; Lyttle, K. Gas metal arc welding of coated steels and shielding gas therefor. *Int. Cl. B23K 9/173. US 7,161,109 B2*. 17 jun. 2004, 9 jan. 2007.

Ngo, M. D.; Duy, V. H.; Phuong N. T.; Kim, H. K.; Kim, S. B., 2007, Development of digital gas metal arc welding system, *Journal of Materials Processing Technology*, p. 384-391.

Novozhilov, N. M. (1988) *Fundamental Metallurgy of Gas Shielded Arc Welding*. Gordon and Breach Science Publishers S. A. Amsterdam. 1988. 400 p. OHNO, A. *Solidificação dos Metais*. Livraria Ciência e Tecnologia Editora Ltda. São Paulo – SP. 185 p.

Palma, M. H. C., Tiera, V. A. O. (2003) Oxidação de metais. *QUÍMICA NOVA NA ESCOLA*. N° 18.

Paula, A.G.G. (1987), Influência da utilização dos processos de soldagem SMAW, MIG-MAG, FCAW e SAW, no custo e no prazo de fabricação de estruturas metálicas, anais 13o ENTS.

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

- Prado, E. M. (2004). Influência das variáveis do processo MIG-MAG Convencional e MIG Pulsado nas propriedades mecânicas de juntas soldadas com arame ER410NiMo. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) Curitiba – PR, Universidade Federal do Paraná, 97 p.
- Praveen, P.; Yarlagadda P. K. D. V.; Kang, M. J., (2005), Advancements in pulse gas metal arc welding, *Journal of Materials Processing Technology*, p. 164–165.
- Quintino, L.; Pires, I. (1996) Influence of Shielding Gas Composition on Features of the MIG-MAG Process. *Secção de Tecnologia Mecânica, Instituto Superior Técnico. Lisboa IIW Doc. XII-1427-96. P. 219 – 235.*
- Rezende, G. M. C., Liskévych, O., Vilarinho, L. O., Scotti, A., (2011). Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem MIG-MAG por Curto-Circuito. *Soldagem e Inspeção, São Paulo, 16(2): 098-103.*
- Rouault, P.; Diot, H. Shielding gas mixture and process for arc welding of stainless steel workpieces. *Int. Cl. B23K 9/167. US 5,739,503. 19 mar. 1996, 14 abr. 1998.*
- Santana, I. J., Modenesi, P.J., (2009). Modelagem Matemática do processo de Soldagem MIG-MAG – Modelo Estático. CD-ROM dos Anais do 5.º COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – Seleção de Soldagem, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Sathiya, P.; Mishra, M.K.; Shanmugarajan, B., (2012). Effect of shielding gases on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel by hybrid welding. *Materials and Design, 33: 203-212.*
- Schultz, J.P.; Soler, J.; Nicoud, D. Gas mixture and welding method. *Int. C.I. B23K 9/173. US 4,999,474. 27 mar. 1990, 12 mar. 1991.*
- Schwedersky, M. B., Dutra, J. C., Okuyama M.P., Silva, R. H. G. (2011) Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos. *Soldagem e Inspeção, São Paulo, 16(34): 333-340.*
- Scotti, A., Ponomarev, V. (2008) Soldagem MIG-MAG. São Paulo. Artliber Editora. 284 p.
- Selander, L.; Fahlén, L.; Sipek, L. Method for decomposing ozone. *Int. Cl. B23K 9/16. US 4,292,493. 5 jul. 1979, 29 set. 1981.*
- SFA-A5.18 / SFA-5.18M, (2013). Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code.
- SFA-A5.32 / SFA-5.32M, (2013). Specification for Welding Shielding Gases. ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code.

Silva, A. F.; Delforge, D. Y. M.; Tokimatsu, R. C.; Ventrella, V. A, 2003. Análise Microestrutural do Metal de Solda de Perfis Soldados de Um Lado Só Utilizados na Construção Civil; <http://www.dem.feis.unesp.br/maprotec/publicacoes.shtml> em 15/05/2009 página mantida pela UNESP.

Silva, R. H. G., Dutra, J. C., Jr, R. G., (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. Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol. 13 (1): 070-071.

Souza, D., Rossi, M. L., Keochequerians, F., Nascimento, V. C., 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. Soldagem e Inspeção, São Paulo, 16(2): 114-122.

Souza, D., Rossi, M. L., Keochequerians, F., Nascimento, V. C., Vilarinho, L. O., Scotti, A., (2011). Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG-MAG Operando em Curto-Circuito. Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol. 16 (1): 022-032.

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

Suban, M.; Tusek, J. (2001) Dependence of Melting Rate in MIG-MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. Materials Processing Technology. N. 119, p. 185 – 192.

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

Suban, M.; Tusek, J., Uran, M. (2001). Use of hydrogen in welding engineering in former times and today. Journal of Materials Processing Technology. P. 193-198.

Tatagiba, L. C. S (2009). Desenvolvimento de Suporte de Solda à Base de Tecido de Fibra de Vidro. Tese (Mestrado em engenharia e Ciências dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 107 p.

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

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

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

The James F. Lincoln Arc Welding Foundation (2000). The Procedure Handbook of Arc Welding, Fourteenth Edition.

Tuttle, W.H. Method of welding material with reduced porosity. Int. Cl. B23K 9/167. US 2007/ 0045238 A1. 29 ago. 2005, 1 mar. 2007.

Umehara, Y., Suzuki, R., Nakano, T. (1947) Development of Innovative MIG-MAG Wire with Improved Flowing Characteristics of Molten Pool. IIW Doc. XII-1947-08

Vaidya, V. V. (2002) Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds. Welding Journal. V. 81, n. 09, p. 43 – 48.

Wada, K.; Kamei, T. Shielding gases for mag-welding of galvanized steel sheets and welding method using the same. Int. Cl. B23K 9/16. US 7,718,915 B2. 22 out. 2007, 18 maio 2010.

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

Wang, F.; How, W. K.; Hu, S.J.; Kannatey-Asibu, E.; Schultz, W.W.; Wang, P. C. (2003), “Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding”, Journal of Physics D: Applied Physics. April.

Wills, K.L. Welding Method. Int. C.I. 219-74. US 3,102,188. 12 ago. 1959, 27 ago. 1967.

Wolff, L.; Mantel, W. Protective gas mixture for light arc welding with a fusible blank were electrode. Int. Cl. 219 – 74. US 3,139,506. 14 abr. 1961, 30 jun. 1964.