

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO NOS GASES DE
PROTEÇÃO CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW EM JUNTAS
DE TOPO E ÂNGULO

FELIPE GOMES DOS SANTOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
ABRIL - 2018

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO NOS GASES DE
PROTEÇÃO CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW EM JUNTAS
DE TOPO E ÂNGULO

FELIPE GOMES DOS SANTOS

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

Orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

ABRIL - 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

40/2018

Santos, Felipe Gomes dos

Estudo do efeito da adição de hidrogênio nos gases de proteção convencionais na soldagem GMAW em juntas de topo e ângulo / Felipe Gomes dos Santos. – Campos dos Goytacazes, 2018.

xi, 132 f. : il.

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

Orientador: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos.

Área de concentração: Metalurgia física.

Bibliografia: f. 125-132.

1. GMAW 2. ESTABILIDADE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA 3. GASES DE PROTEÇÃO 4. H₂ I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título

CDD 669.9

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO NOS GASES DE
PROTEÇÃO CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW EM JUNTAS
DE TOPO E ÂNGULO

FELIPE GOMES DOS SANTOS

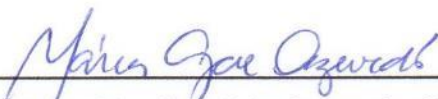
Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovado em 18 de abril de 2018.

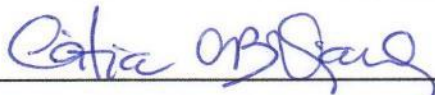
Comissão Examinadora:



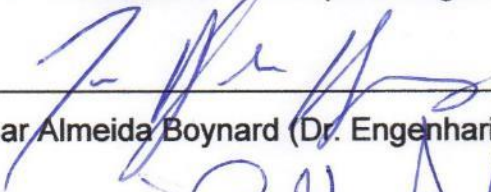
Prof^a. Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova (Dra. Ciência de Materiais Metálicos e Tratamentos Térmicos) – UENF



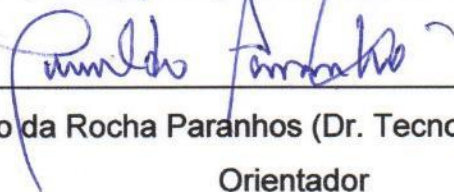
Prof^a. Márcia Giardinieri de Azevedo (Dra. Engenharia Química) – UENF



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



Prof. César Almeida Boynard (Dr. Engenharia Mecânica) – UCAM



Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos (Dr. Tecnologia da Soldagem) – UENF

Orientador

*“Uma jornada de duzentos quilômetros
começa com um simples passo.”*

(Provérbio chinês)

Dedico este trabalho aos meus pais José Carlos e Sandra, por todo amor, incentivo e educação fornecida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

A minha família e amigos, em especial aos meus irmãos, Anderson e Carlos Alberto, e aos nossos incríveis pais, José Carlos e Sandra, por compreenderem as ausências necessárias para a realização do mestrado.

A minha namorada Laura, por todo amor, carinho e suporte no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor orientador Ronaldo Paranhos por compartilhar o seu conhecimento e experiência, e pela oportunidade de participar deste gratificante e enriquecedor trabalho.

Ao corpo docente do LAMAV-UENF que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Aos funcionários da Fundação de Apoio à Escola Técnica (FAETEC), em especial ao Jossandro e ao Fabiano Portal, pela receptividade, disponibilidade e recursos oferecidos para a realização dos experimentos.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificativa.....	2
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Processo de soldagem GMAW.....	4
2.1.1 Princípios do processo.....	4
2.1.2 Equipamentos para soldagem.....	6
2.1.3 Arco elétrico.....	7
2.1.3.1 Características das regiões.....	8
2.1.3.2 Coluna de plasma.....	10
2.1.3.3 Emissão catódica.....	10
2.2 Gases de proteção.....	12
2.2.1 Propriedades químicas e físicas dos gases de proteção.....	12
2.2.1.1 Dissociação e ionização.....	12
2.2.1.2 Potencial de ionização.....	14
2.2.1.3 Condutividade térmica.....	14
2.2.1.4 Potencial de oxidação.....	16
2.2.1.5 Densidade relativa.....	18
2.2.2 Gases de proteção utilizados no processo GMAW.....	19
2.2.2.1 Argônio (Ar).....	21
2.2.2.2 Hélio (He).....	21
2.2.2.3 Dióxido de carbono (CO ₂).....	22
2.2.2.4 Oxigênio (O ₂).....	23
2.2.2.5 Nitrogênio (N ₂).....	23
2.2.2.6 Hidrogênio (H ₂).....	24
2.3 Modos de transferência metálica.....	25

2.3.1	Transferência por curto-circuito.....	29
2.3.2	Transferência globular	31
2.3.3	Transferência goticular	32
2.3.4	Forças atuantes na transferência metálica.....	34
2.3.4.1	Teoria do equilíbrio estático das forças.....	34
2.3.4.2	Teoria da instabilidade <i>pinch</i>	38
2.4	Estabilidade do processo GMAW.....	38
2.4.1	Indicadores de estabilidade	39
2.4.2	Sistema de aquisição e análise dos sinais do arco elétrico	43
2.5	Técnicas e parâmetros operacionais.....	46
2.5.1	Principais parâmetros do processo e suas influências	46
2.5.1.1	Corrente	47
2.5.1.2	Tensão	48
2.5.2	Projeto da solda.....	49
2.5.2.1	Juntas.....	51
2.5.2.2	Condições de soldagem	52
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....		54
3.1	Materiais	54
3.2	Metodologia	56
3.2.1	Primeira etapa	56
3.2.1.1	Preparação e soldagem das chapas.....	56
3.2.1.2	Análise qualitativa dos cordões de solda	58
3.2.1.3	Avaliação da estabilidade do arco elétrico	58
3.2.2	Segunda etapa	59
3.2.2.1	Preparação e soldagem dos corpos de prova.....	59
3.2.2.2	Fabricação do coletor de respingos	61
3.2.2.3	Avaliação da quantidade de respingos gerados.....	61
3.2.2.4	Taxa de deposição	61
3.2.2.5	Análise qualitativa dos cordões de solda	62
3.2.2.6	Avaliação da geometria do cordão de solda	62
3.2.3	Terceira etapa.....	63
3.2.3.1	Caracterização microestrutural	63
3.2.3.2	Dureza Vickers	64

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1 Primeira etapa.....	66
4.1.1 Preparação e soldagem das chapas.....	66
4.1.2 Análise qualitativa dos cordões de solda	70
4.1.3 Avaliação da estabilidade do arco elétrico	75
4.1.4 Considerações da primeira etapa	86
4.2 Segunda etapa.....	87
4.2.1 Preparação e soldagem dos corpos de prova.....	87
4.2.2 Fabricação do coletor de respingos	88
4.2.3 Análise qualitativa dos cordões de solda	89
4.2.4 Avaliação da quantidade de respingos gerados.....	96
4.2.5 Taxa de deposição.....	98
4.2.6 Avaliação da estabilidade do arco elétrico	100
4.2.6.1 Comparação entre as juntas	100
4.2.6.2 Comparação entre os gases	103
4.2.6.3 Comparação entre as soldas realizadas nas juntas e na chapa.....	108
4.2.7 Avaliação da geometria do cordão de solda	111
4.2.8 Considerações da segunda etapa.....	115
4.3 Terceira etapa.....	116
4.3.1 Caracterização microestrutural	116
4.3.2 Dureza Vickers	118
4.3.3 Considerações da terceira etapa	121
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	122
CAPÍTULO 6: SUGESTÕES	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação esquemática do processo GMAW.	5
Figura 2.2: Equipamento básico do processo GMAW.	7
Figura 2.3: Representação esquemático do arco elétrico e suas regiões.	9
Figura 2.4: Representação esquemática do mecanismo de emissão catódica.	11
Figura 2.5: Condutividade térmica de alguns gases de proteção em função da temperatura.	15
Figura 2.6: Perfis típicos dos cordões de solda para Argônio e Hélio.	16
Figura 2.7: Posições de soldagem em chapas.	18
Figura 2.8: Exemplo de diagrama TRC da ZF.	25
Figura 2.9. Modos naturais de transferência em função da tensão e corrente na soldagem GMAW.	28
Figura 2.10: Classificação dos modos de transferência metálica.	29
Figura 2.11: Oscilograma típico da transferência por curto-circuito.	30
Figura 2.12: Oscilograma típico da transferência globular.	32
Figura 2.13: Variação da taxa de transferência e volume da gota em função da corrente de soldagem.	33
Figura 2.14: Oscilograma típico da transferência goticular.	33
Figura 2.15: Representação esquemática das forças atuantes na gota em transferência.	34
Figura 2.16: Painel de conexões do SAPV4.	43
Figura 2.17: Oscilograma de corrente na transferência por curto-circuito.	44
Figura 2.18: Oscilograma de tensão na transferência por curto-circuito.	44
Figura 2.19: Informações gerais e dados estatísticos dos sinais adquiridos pelo SAPV4.	46
Figura 2.20: Velocidade de alimentação do arame <i>versus</i> corrente de soldagem. ...	48

Figura 2.21: Ilustração do fenômeno de auto ajuste do comprimento do arco do processo GMAW.....	49
Figura 2.22: Principais tipos de juntas utilizadas em soldagem.....	51
Figura 2.23: Chanfros de soldagem.....	52
Figura 3.1: Sistema de aquisição de dados portátil SAPV4.....	55
Figura 3.2: Dimensões e geometrias das juntas: a) de topo com chanfro “V”; b) de ângulo em “T”.....	60
Figura 3.3: Dimensões da solda de filete em junta “T”: a) solda convexa; b) solda côncava.....	63
Figura 3.4: Dimensões da solda em junta V: a) penetração total da junta; b) penetração parcial da junta.....	63
Figura 3.5: Localização dos pontos onde foram realizadas as medições de dureza Vickers.....	65
Figura 4.1: Preparação da chapa: a) corte da vara de 6 m de comprimento na serra franho; b) chapa após o corte com 200 mm de comprimento; c) remoção de rebarbas e limpeza da chapa com o flap disco; d) chapa pronta para a soldagem.....	66
Figura 4.2: Oscilogramas de tensão e corrente obtidos nos testes preliminares.....	67
Figura 4.3: Soldas executadas com os quatro gases de proteção variando a tensão em função da V_{alim}	69
Figura 4.4: Momento de instabilidade do arco elétrico: a) extinção; b) reignição.....	71
Figura 4.5: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IV_{cc} de acordo com a tensão para o CO_2 com V_{alim} de 3,0 m/min.....	77
Figura 4.6: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IV_{cc} de acordo com a tensão para o CO_2 com V_{alim} de 4,6 m/min.....	78
Figura 4.7: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IV_{cc} de acordo com a tensão para o $Ar+25\%CO_2$ com V_{alim} de 3,0 m/min.....	79
Figura 4.8: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IV_{cc} de acordo com a tensão para o $Ar+25\%CO_2$ com V_{alim} de 4,6 m/min.....	80

Figura 4.9: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e Ivcc de acordo com a tensão para o CO ₂ +3%H ₂ com V _{alim} de 3,0 m/min.	81
Figura 4.10: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e Ivcc de acordo com a tensão para o CO ₂ +3%H ₂ com V _{alim} de 4,6 m/min.	82
Figura 4.11: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e Ivcc de acordo com a tensão para o Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂ com V _{alim} de 3,0 m/min.....	83
Figura 4.12: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e Ivcc de acordo com a tensão para o Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂ com V _{alim} de 4,6 m/min.....	84
Figura 4.13: Composição do código de identificação dos corpos de prova.	88
Figura 4.14: Coletor de respingos.	88
Figura 4.15: Coletor de respingos com: a) junta “T” e sem as tampas; b) junta “V” e tampado.	89
Figura 4.16: Cordões de solda executados na segunda etapa.....	94
Figura 4.17: Respingos coletados para os gases: a) CO ₂ ; b) CO ₂ +3%H ₂ ; c) Ar+25%CO ₂ ; d) Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	96
Figura 4.18: Taxa de deposição de acordo com o gás de proteção para: a) V _{alim} = 3 m/min; b) V _{alim} = 4,6 m/min.....	99
Figura 4.19: Variação dos índices de estabilidade de acordo com a atmosfera de proteção utilizada na soldagem com V _{alim} = 3,0 m/min: a) DPPC; b) DPAA; c) DPCC; d) Ivcc.	104
Figura 4.20: Variação dos índices de estabilidade de acordo com a atmosfera de proteção utilizada na soldagem com V _{alim} = 4,6 m/min: a) DPPC; b) DPAA; c) DPCC; d) Ivcc.	106
Figura 4.21: Variação dos índices de estabilidade de acordo com o local de realização das soldas (juntas T e V ou sobre a chapa) e a atmosferas de proteção com V _{alim} = 3,0 m/min: a) DPPC; b) DPAA; c) DPCC; d) Ivcc.....	108
Figura 4.22: Variação dos índices de estabilidade de acordo com o local de realização das soldas (juntas T e V ou sobre a chapa) e a atmosferas de proteção com V _{alim} = 4,6 m/min: a) DPPC; b) DPAA; c) DPCC; d) Ivcc.....	110

Figura 4.23: Macrografia dos corpos de prova: a) 14VB; b) 24VB; c) 34VB; d) 44VA.	111
Figura 4.24: Macrografia dos corpos de prova: a) 14TB; b) 24TA; c) 34TA; d) 44TA.	113
Figura 4.25: Micrografia panorâmica mostrando a variação da microestrutura. A ZTA está dividida em: a) região de granulação grosseira; b) região de normalização; c) região intercrítica; d) região subcrítica. Aumento de 200X.	116
Figura 4.26: Micrografias do metal fundido: a) CO ₂ ; b) CO ₂ +3%H ₂ ; c) Ar+25%CO ₂ ; d) Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂ . Aumento de 500X.	117
Figura 4.27: Variação da dureza Vickers em função do gás de proteção utilizado.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Potencial de ionização dos gases de proteção mais utilizados em soldagem.	14
Tabela 2.2: Densidade dos gases de proteção mais utilizados em soldagem.	18
Tabela 2.3: Formulações de gás de proteção para soldagem a arco elétrico.	19
Tabela 2.4: Modos de transferência naturais do processo GMAW.	26
Tabela 2.5: Ajustes dos parâmetros e influência nas características da solda.	47
Tabela 2.6: Condições de soldagem em aço carbono com transferência por curto-circuito e arame ER70S-3.	53
Tabela 3.1: Composição química requerida para o aço SAE 1020.	54
Tabela 3.2: Composição química requerida para o eletrodo ER70S-6.	54
Tabela 3.3: Faixas de medição do sistema de aquisição de dados SAPV4.	55
Tabela 3.4: Parâmetros utilizados para soldagem das chapas.	57
Tabela 3.5: Quantidade de chapas necessárias para execução do procedimento com o CO ₂	60
Tabela 3.6: Microestruturas principais do metal de solda.	64
Tabela 4.1: Faixa de tensão mais estável para cada gás de acordo com a análise qualitativa.	74
Tabela 4.2: Dados regulados e obtidos nas soldas da primeira etapa para os diferentes gases de proteção.	76
Tabela 4.3: Faixa de tensão mais estável para cada gás de acordo com a análise quantitativa.	85
Tabela 4.4: Parâmetros mais estáveis de cada gás selecionados na primeira etapa.	87
Tabela 4.5: Taxa de respingos e dados utilizados para o cálculo.	96
Tabela 4.6: Taxa de deposição e dados utilizados para o cálculo.	98

Tabela 4.7: Média dos sinais elétricos e índices de estabilidade dos corpos de prova soldados na segunda etapa.	101
Tabela 4.8: Valores de p obtidos na comparação entre os índices de estabilidade das juntas “V” e “T”.	102
Tabela 4.9: Índices de estabilidade com suas médias e erros para cada gás, utilizando $V_{alim} = 3,0$ m/min.	103
Tabela 4.10: Índices de estabilidade com suas médias e erros para cada gás, utilizando $V_{alim} = 4,6$ m/min.	105
Tabela 4.11: Penetração da raiz e dados elétricos dos corpos de prova com as macrografias analisadas.	112
Tabela 4.12: Dimensões e dados elétricos dos corpos de prova com as macrografias analisadas.	113
Tabela 4.13: Valores de dureza Vickers do MB, ZTA e ZF em soldas obtidas com as atmosferas de CO_2 , $CO_2+3\%H_2$, $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$	119

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da adição de 1,5% de H₂ no gás de proteção Ar+25%CO₂ e de 3% de H₂ no gás CO₂, na soldagem do aço baixo carbono pelo processo GMAW com transferência por curto-circuito em juntas de topo com chanfro “V” e em juntas de ângulo “T”. A metodologia foi desenvolvida em três etapas: na etapa 1, foram escolhidas duas velocidades de alimentação de arame e, por meio da análise qualitativa dos cordões de solda e da avaliação da estabilidade do arco elétrico, foi determinada a faixa de operação do processo; na etapa 2, para cada tipo de junta utilizada, além da estabilidade das soldas, foi avaliada a taxa de respingos, a taxa de deposição e a geometria do cordão de solda; na etapa 3, foi avaliada a influência da adição de H₂ em relação à microestrutura e dureza do metal de solda, mediante caracterização microestrutural e ensaio de dureza Vickers. Os resultados identificaram a presença de faixas de tensões com boa estabilidade do processo em todos os gases, variando em função do gás e da velocidade de alimentação utilizada. A adição de 1,5% de H₂ no Ar+25%CO₂ reduziu a taxa de respingos, mas não foi observada alteração para a adição de 3% de H₂ no CO₂. A taxa de deposição nos gases contendo H₂ foi superior ao respectivo gás convencional. A estabilidade do arco elétrico não sofreu alterações em função do tipo de junta soldada, entretanto os resultados sugerem que os gases com H₂ possuem um melhor comportamento operacional com parâmetros elétricos mais elevados, apresentando estabilidade do arco elétrico igual ou superior à dos gases convencionais. A adição de H₂ tende a aumentar a penetração na raiz da junta “V” e a garganta efetiva na junta “T”. As juntas soldadas com os gases contendo H₂ apresentaram uma ligeira redução de dureza na zona fundida, apesar de não terem sido identificadas alterações significativas na microestrutura da mesma. Por fim, é possível concluir que a adição de H₂, nos teores utilizados, melhoram a estabilidade do processo ao utilizar uma faixa de corrente e tensão mais elevada.

Palavras-chave: GMAW, Estabilidade da transferência metálica, Gases de proteção, H₂.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the effect of adding 1,5% H₂ to Ar+25%CO₂ shielding gas and 3% H₂ to CO₂ gas on the welding of low carbon steel by the GMAW process in short-circuit transfer mode on V-groove butt joint and angle T joint. The methodology was divided into three steps: in the first step, two wire feed speeds were chosen and, by the qualitative analysis of the weld beads and the arc stability assessment, the process operating range was determined; in the second step, besides the weld stability, it was evaluated the spatter rate, the deposition rate and the weld bead geometry for each joint type; in the third step, it was assessed the H₂ addition influence in relation to the microstructure and hardness of the weld metal through the microstructural characterization and Vickers hardness test. The found results identified voltage ranges with good process stability for all gases, varying in a function of the gas and the wire feed speed used. The addition of 1,5 H₂ to Ar+25%CO₂ reduced the spatter rate, but no change was observed in adding 3% H₂ to CO₂. The deposition rate of gases containing H₂ was higher than the respective conventional gas. The stability of the electric arc did not change due to the type of welded joint. However, the results suggest that the gases with H₂ have a better operational performance with higher electrical parameters, showing equal or better arc stability than conventional gases. The H₂ addition tends to increase the V joint root penetration and the T joint effective throat. The joints welded with H₂ containing gases exhibited a slight decrease in welded metal hardness, although no significantly changes in its microstructure was identified. Finally, it is possible to conclude that adding H₂, in the contents used, improves the process stability when using a higher current and voltage range.

Keywords: GMAW, Metal transfer stability, Shielding gases, H₂.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) baseia-se na fusão de metais através de um arco elétrico estabelecido entre a ponta do arame-eletrodo, alimentado continuamente, e a peça a ser soldada. O eletrodo, na forma de arame, funde-se em sua extremidade e, devido as forças atuantes, é transferido para a poça de fusão localizada na superfície da peça em forma de pequenas gotas. Tanto as gotas em transferência como a poça de fusão são protegidas da contaminação atmosférica por um gás ou mistura adequada de gases.

Este processo de soldagem possui uma vasta aplicação devido a possibilidade de sua utilização em todos os metais comercialmente importantes em uma ampla faixa de espessura, podendo ser utilizado em todas as posições de soldagem. Apresenta elevada capacidade de produção quando comparado ao processo por eletrodo revestido, além da possibilidade de variação do modo de transferência metálica e da conveniência para mecanização e robotização.

Apesar do processo GMAW ser bem estabelecido e com diversos trabalhos acerca dele, existem muitos itens a serem investigados e desenvolvidos não apenas no que diz respeito a automação e incremento de produção, mas também em seus princípios. Itens como a heterogeneidade da interação entre o gás de proteção, as variáveis e a estabilidade do processo carecem ainda de um melhor entendimento.

O gás de proteção utilizado pode ser inerte, ativo ou uma mistura desses. Além de proteger a região da solda, a proteção gasosa também exerce forte influência na estabilidade do arco, tipo de transferência metálica, velocidade de soldagem, quantidade de respingos e escória gerados, geometria do cordão de solda e propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal de solda.

Devido a significativa influência do gás de proteção no processo de soldagem GMAW, o presente trabalho visa analisar o efeito da adição de H₂ na mistura de proteção devido a sua alta condutividade térmica e capacidade de reduzir óxidos.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo estudar o efeito da adição de 1,5% de H₂ no gás de proteção Ar+25%CO₂ e de 3% de H₂ no gás CO₂, na soldagem do aço

baixo carbono pelo processo GMAW com transferência por curto-circuito em juntas de topo com chanfro “V” e em juntas de ângulo “T”. Para tanto, foi analisada a estabilidade do processo em condições operacionais aplicáveis a indústria.

1.2 Objetivos específicos

- Para cada gás de proteção utilizado e de acordo com a velocidade de alimentação de arame e tensão, encontrar faixas de estabilidade do processo.
- Analisar a estabilidade do processo de soldagem pelo monitoramento dos sinais elétricos.
- Comparar os resultados dos corpos de prova soldados com atmosferas de proteção convencionais com suas respectivas misturas contendo H₂.
- Calcular a taxa de respingos e a taxa de deposição de acordo com o gás utilizado.
- Caracterizar a microestrutura e medir a dureza Vickers do metal de solda.

1.3 Justificativa

Nas últimas quatro décadas, observou-se através da literatura e nas requisições de patentes que houve um grande avanço em relação a tecnologia utilizada nos equipamentos de soldagem. Porém, os gases de proteção, apesar da variação no percentual da mistura, continuam a base de Ar, He, CO₂ e O₂. Identificou-se também a utilização de H₂, N₂ e NO para aplicações específicas e de gases distintos dos já citados, mas sem aplicação industrial (Tatagiba, Gonçalves e Paranhos, 2012).

Com a alta competitividade do mercado, as indústrias visam aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção. Com base neste cenário, o desenvolvimento de novas misturas gasosas para o processo de soldagem torna-se atraente, uma vez que pode diminuir os custos envolvidos devido ao aumento da velocidade de soldagem, a diminuição de perdas por respingo e trabalho de limpeza pós soldagem.

Mesmo que o custo de uma nova mistura gasosa seja maior do que as já utilizadas, ela ainda poderá acarretar em uma redução dos custos. Pois segundo Irving (1999) o gás de proteção na soldagem em aço carbono representa apenas 3%

dos custos envolvidos, enquanto a mão de obra é responsável por cerca de 77%, ou seja, ainda que o gás seja mais caro, se o operador levar menos tempo para realizar o serviço poderá ocorrer contenção dos custos.

Neste sentido, o H_2 torna-se uma alternativa por ser classificado como um gás redutor e possuir a maior condutividade térmica entre os gases utilizados na soldagem. Assim, pode-se esperar uma maior zona fundida, aumentando então a velocidade de soldagem para produzir um cordão de solda com geometria similar ao produzido pelo gás sem a adição do H_2 .

De acordo com Tatagiba (2015) e Menezes (2016), a adição de H_2 em misturas de proteção convencionais contendo CO_2 tende a melhorar a estabilidade do processo sem alterar a microestrutura e as propriedades do metal de solda. Menezes (2016) concluiu que com a adição de 2% de H_2 no $Ar+25\%CO_2$ não ocorre mudanças significativas na estabilidade do arco elétrico, no entanto a adição 4% de H_2 no CO_2 melhora consideravelmente a estabilidade do mesmo. Em ambos os casos a taxa de respingos diminuiu com a adição do H_2 , sendo este efeito mais pronunciado no CO_2 puro.

É importante salientar que os trabalhos de Tatagiba (2015) e Menezes (2016) não foram realizadas em condições operacionais aplicáveis a indústria, sendo realizadas soldas do tipo cordão sobre a chapa. Nesses trabalhos, se fixou a tensão e ajustou-se a velocidade de alimentação de arame (proporcional a corrente de soldagem) de acordo com a experiência do soldador para verificar o melhor conjunto desses parâmetros para cada gás de proteção. Já no presente trabalho, as soldas foram efetuadas em condições operacionais em juntas de topo com chanfro "V" e em juntas de ângulo "T". Além disso, opostamente aos trabalhos citados, se fixou a velocidade de alimentação de arame e variou-se a tensão, dentro de uma faixa preestabelecida, para encontrar quantitativamente o melhor conjunto desses parâmetros para cada gás de proteção.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de soldagem GMAW

2.1.1 Princípios do processo

O processo de soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*) é um processo em que a coalescência dos metais é feita pelo aquecimento destes através de um arco elétrico estabelecido entre a ponta do arame-eletrodo, alimentado continuamente, e a peça de trabalho. A proteção da região da solda contra contaminação atmosférica é feita através de um gás ou mistura de gases inertes ou ativos. De acordo com o caráter inerte ou ativo da proteção, o processo GMAW é também conhecido como MIG (*Metal Inert Gas*) ou MAG (*Metal Active Gas*), respectivamente (Marques et al., 2009; Machado, 1996).

O desenvolvimento do processo GMAW iniciou-se, assim como os demais processos de soldagem a arco, com a descoberta do arco elétrico por Humphry Davy em 1800, utilizando eletrodos de carbono. Durante a década de 1890, o americano C. L. Coffin patenteou o uso de eletrodo metálico para soldagem a arco. Já o russo N.G. Slavianoff utilizou-se do mesmo princípio para fundição de metal em moldes. Em 1920 um antecessor do processo GMAW foi criado por P.O. Nobel da *General Electric*, ele utilizou um arame-eletrodo nu com corrente contínua e regulou a taxa de alimentação através da tensão do arco. Outro precursor do GMAW foi conhecido em 1926, mas ainda não era apropriado para utilização prática. Apenas em 1948 o GMAW foi desenvolvido pelo *Battelle Memorial Institute* com o uso de um eletrodo de menor diâmetro e uma fonte de tensão constante. Obteve-se uma alta taxa de deposição, porém o custo elevado do gás inerte limitou sua aplicação a materiais não ferrosos e impediu a economia de custos. Em 1953 a utilização de dióxido de carbono como atmosfera protetora foi popularizada por Lyubavskii e Novozhilov e ganhou notoriedade rapidamente pois tornou a soldagem do aço economicamente viável (Cary, 2005; Coffin, 1890; Hashmi, 2014).

A soldagem GMAW pode ser utilizada de forma semiautomática, quando o movimento da tocha é realizado por um operador, ou automática, quando o movimento da tocha é realizado por uma máquina. Vale ressaltar que em ambos os casos a alimentação do arame é realizada mecanicamente através de um alimentador motorizado, sendo o operador/soldador responsável por fornecer os ajustes iniciais na máquina de solda que mantém as características elétricas do arco. Para operações semiautomáticas, o soldador também é responsável por controlar a direção e velocidade do movimento da tocha e o seu posicionamento (Vaidya, 2002; AWS, 2004; Scotti e Ponomarev, 2014). A Figura 2.1 ilustra esquematicamente o processo.

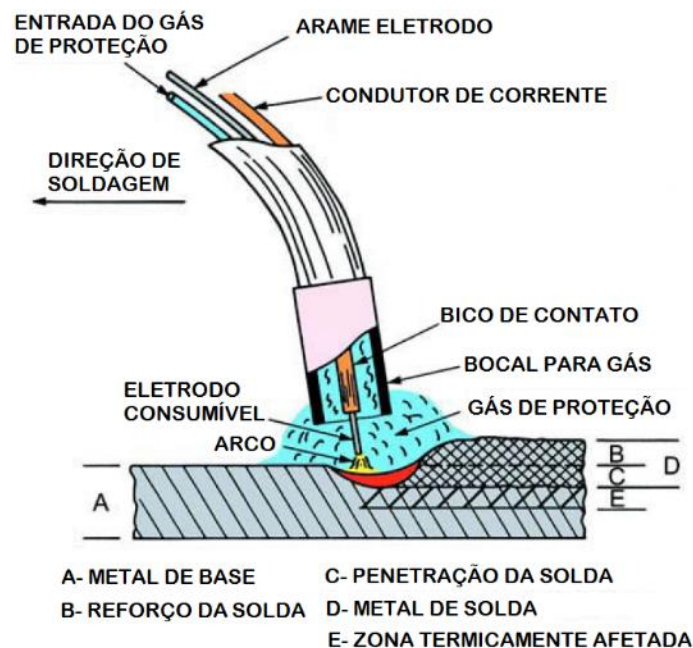


Figura 2.1: Representação esquemática do processo GMAW.

Fonte: Adaptado de AWS (2004)

Todos os metais comercialmente importantes, tais como: aço carbono, aço inoxidável, aço de baixa liga e de alta resistência, cobre, alumínio, titânio e ligas de níquel podem ser soldados em todas as posições pelo processo GMAW, desde que sejam feitas as escolhas apropriadas do gás de proteção, eletrodo e variáveis de soldagem (AWS, 2004; Weglowski et al., 2008).

Devido a sua versatilidade, a soldagem GMAW é empregada desde pequenas indústrias até as responsáveis por grandes produções e alta qualidade (Machado, 1996). De acordo com Scotti e Ponomarev (2014), AWS (2004) e Pires et al. (2006), as principais vantagens desse processo são: elevada velocidade e taxa de fusão

quando comparado ao eletrodo revestido, além de não necessitar de paradas frequentes para troca de eletrodo, soldagem em todas as posições, possibilidade de variação do modo de transferência metálica, menor necessidade de limpeza pós-soldagem e conveniência para mecanização e robotização. Já as suas principais restrições são: equipamento mais caro, complexo e menos portátil quando comparado ao eletrodo revestido, necessidade de se conhecer como regular os parâmetros de soldagem e à inter-relação entre eles, processo sensível aos efeitos do vento que podem dissipar a proteção gasosa e aplicação restrita em locais com pouco espaço devido ao tamanho da tocha.

2.1.2 Equipamentos para soldagem

De acordo com Nadzam et al. (2011), Fortes e Vaz (2005) e Scotti e Ponomarev (2014), os equipamentos básicos do processo GMAW e suas respectivas funções são:

- Fonte de energia: produz tensão e corrente em níveis adequados para o processo de soldagem. A energia elétrica usual (alta tensão e baixa corrente) é convertida através de transformadores presentes nas fontes de energia para valores menores de tensão e maiores de corrente. De acordo com a reação quando submetida a diferentes cargas (CEF – Característica Estática da Fonte), as fontes são classificadas em: corrente constante e tensão constante (mais utilizadas e ditas convencionais).

- Sistema de alimentação do arame-eletrodo: impulsiona o arame-eletrodo para a região da solda, ou seja, é responsável pelo fornecimento do material de consumo. A velocidade de alimentação, pré-ajustada na máquina, deve ser precisa para evitar instabilidades e alterações de outros parâmetros relacionados a este. A maioria dos sistemas de alimentação fornecerá uma velocidade de 2 a 20 m/min.

- Tocha de soldagem: direciona o fluxo do gás de proteção e o arame-eletrodo para a região da solda. Seus principais componentes são: bico de contato, responsável em transmitir a energia de soldagem para o arame e também direcionar o arame para a peça; bocal, direciona o fluxo de gás, função garantida pelos difusores, para a região da soldagem; conduíte, conduz o arame-eletrodo do sistema de alimentação à tocha; cabo da tocha, envolve os dutos que levam o gás, o cabo de energia, o cabo de acionamento e o arame-eletrodo.

- Gás de proteção com regulagem de pressão e fluxômetro: a alimentação correta do gás de proteção é importante para a qualidade da solda (maiores detalhes serão apresentados no item 2.2). O soldador recebe duas leituras do sistema de gás, sendo a primeira a pressão interna do cilindro, que permite saber o quanto de gás tem no cilindro, e a segunda mede a vazão do gás que sai do cilindro.

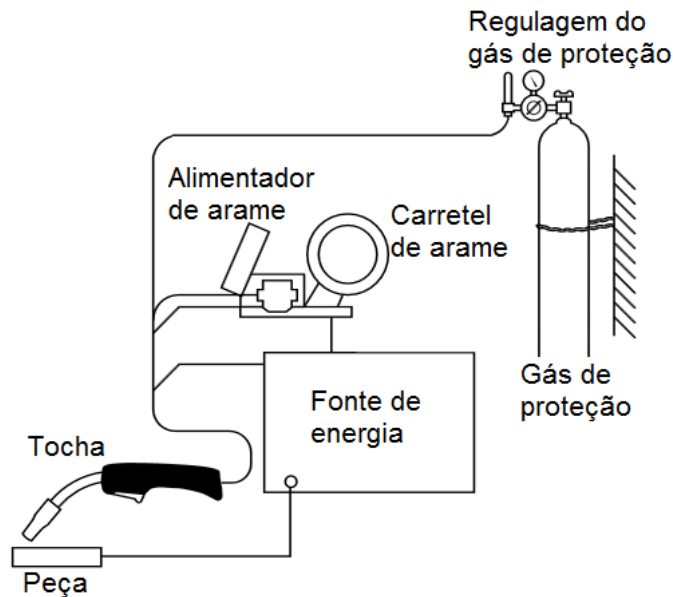


Figura 2.2: Equipamento básico do processo GMAW.

Fonte: Adaptado de Nadzam et al. (2011)

2.1.3 Arco elétrico

Localizado entre a ponta do arame-eletrodo e a peça de trabalho, o arco elétrico conduz uma elevada corrente gerando alta intensidade de calor e luz. Devido às suas características tais como: concentração de energia para fusão localizada, fácil controle e baixo custo relativo, o arco elétrico é a fonte de calor mais usada na soldagem por fusão de materiais metálicos (Modenesi, 2012).

Sabe-se que, em condições normais, os gases não são condutores de eletricidade. Porém, na soldagem os gases são submetidos a um arco elétrico de alta intensidade com elevada temperatura, sendo essa condição favorável para que o gás passe para o quarto estágio da matéria, o plasma, sendo este condutor de eletricidade (Scotti e Ponomarev, 2014). Através do aquecimento ôhmico, a elevada temperatura do arco é mantida, balanceando as perdas por condução, convecção e radiação (Lancaster, 1984).

À procura de explicações consistentes a respeito dos fenômenos que acontecem no arco elétrico, muitos pesquisadores desenvolvem metodologias de pesquisa para possibilitar a identificação e medição de propriedades características deste. Contudo, o ambiente altamente agressivo e sua pequena dimensão tornam o entendimento dos fenômenos físico-químicos do arco bastante complexo. Ainda assim, muitos resultados relacionados a emissão de elétrons, transferência metálica, gases de proteção e formação do plasma têm proporcionado uma evolução constante dos processos de soldagem (da Costa et al., 2003). Mesmo com inúmeros estudos sobre o arco elétrico, não há uma congruência entre as teorias para os aspectos relacionados a sua formação, comportamento, influência no processo e características térmicas. Tendo como exemplo a temperatura do plasma formado, encontram-se citações de diferentes autores expondo temperaturas de 6727° C, 9726° C e uma faixa de 6000° C a 12000° C (Silva et al., 2007).

2.1.3.1 Características das regiões

O arco elétrico pode ser dividido longitudinalmente em três regiões: região anódica, coluna de plasma e região catódica. Em função da corrente elétrica que passa em cada uma dessas regiões, ocorre nas mesmas uma queda de tensão característica (Scotti e Ponomarev, 2014; Modenesi, 2012; Cayo e Alfaro, 2012). Segundo Silva et al. (2007), o arco elétrico no processo GMAW apresenta um comportamento similar a um condutor metálico, isto é, a queda de tensão aumenta proporcionalmente com a corrente de soldagem. Apesar de, em termos de volume, o arco elétrico ser constituído basicamente pela coluna de plasma (apresentando normalmente entre 1 a 10 mm, enquanto as regiões arco-eletrodo e arco-peça possuem um comprimento da ordem de 10^{-3} e 10^{-4} mm, respectivamente), a queda de tensão da coluna não ultrapassa alguns poucos volts. Entretanto, a queda de tensão da região catódica varia entre 5 e 20 V e a da região anódica entre 2 a 8 V (Scotti e Ponomarev, 2014; Modenesi, 2012).

Na Figura 2.3 observa-se um esquema do arco elétrico e suas regiões com uma analogia a resistores em série (R_{ra} – resistência à passagem de corrente elétrica na região anódica; R_{ca} – resistência à passagem de corrente elétrica na coluna de arco; R_{rc} – resistência à passagem de corrente elétrica na região catódica).

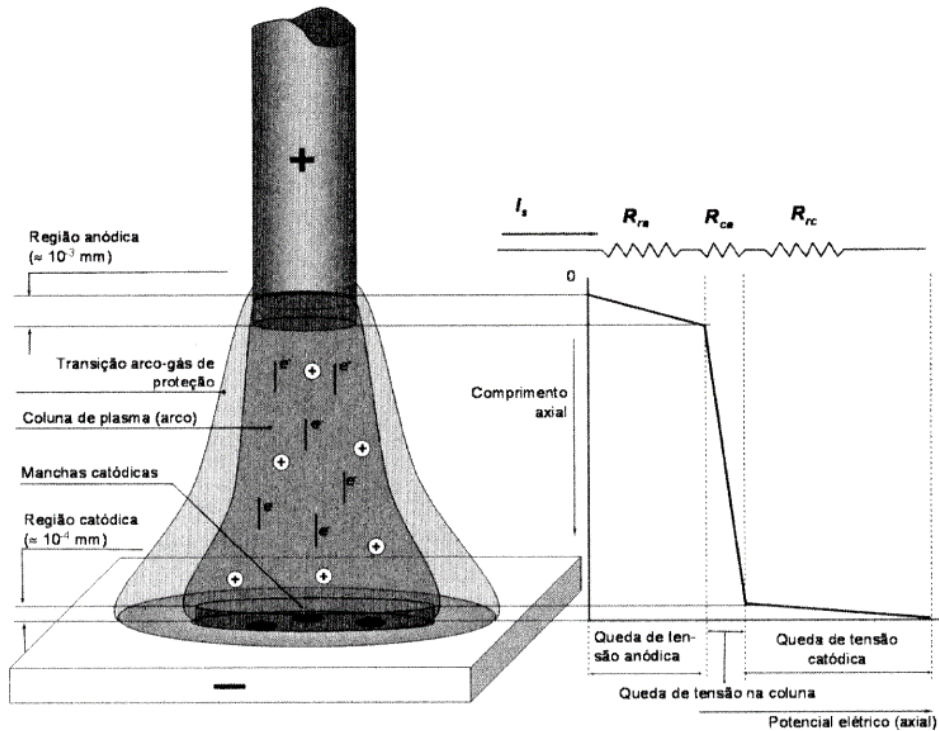


Figura 2.3: Representação esquemático do arco elétrico e suas regiões.

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

Embora possua um volume desprezível, a região catódica é fundamental para a existência do arco elétrico, pois é dela que emergem os elétrons que fluem pelo arco voltaico, responsáveis em conduzir boa parte da corrente elétrica do cátodo (-) para o ânodo (+). A capacidade do cátodo em emitir elétrons, normalmente constituído pela peça no processo GMAW, depende da função de trabalho e temperatura deste (Baixo, 1999). O aquecimento dessa região é realizado principalmente pela ação dos íons incidentes através da energia cinética entregue na colisão destes com o cátodo (Silva et al., 2007).

Embora seja fundamental para a manutenção do arco elétrico, a região anódica não é tão importante para o arco como a região catódica, tendo assim um menor número de estudos a respeito desta. Ao contrário da analogia que possa ser feita com o cátodo que emite elétrons, o ânodo não emite íons, estes são gerados pela ionização dos átomos na coluna do arco. Elétrons oriundos do cátodo, atravessam a coluna do arco e entregam energia cinética ao ânodo, sendo responsável pelo seu aquecimento e um acúmulo de elétrons nessa região que geram uma queda de tensão (Modenesi, 2012; Silva et al., 2007).

2.1.3.2 Coluna de plasma

A coluna de plasma é responsável pelo maior volume do arco, sendo constituída por moléculas e átomos (partículas neutras), elétrons (responsáveis pela passagem de corrente) e íons. Devido à elevada temperatura no arco, a energia de vibração das moléculas dos gases e vapores metálicos presentes aumenta, podendo ocorrer a dissociação. Em função de temperaturas ainda mais elevadas e ao choque com os elétrons, pode ocorrer a ionização dos átomos, ou seja, a expulsão de elétrons das camadas mais externas e a formação do plasma (Modenesi, 2012).

O plasma de um arco voltaico se mantém devido ao calor gerado pela própria corrente que o atravessa, por causa do choque entre os elétrons e os átomos causando a sua ionização. Quanto mais elétrons se chocam com um mesmo átomo, mais fácil será ionizá-lo. Mas sempre haverá a necessidade de uma diferença de potencial mínimo para manter o arco aberto, caso a fonte de energia não supra essa necessidade o arco vai gradativamente se apagar. No entanto, caso a fonte disponibilize mais tensão do que a demandada pelo arco, a tensão do arco será aquela requerida. A tensão da coluna de plasma é função da capacidade de troca térmica com o meio, do potencial de ionização, da corrente e da geometria do arco, mantendo entre si uma relação complexa (Scotti e Ponomarev, 2014).

2.1.3.3 Emissão catódica

O método mais aceito para explicar a emissão de elétrons no processo GMAW é o fenômeno denominado emissão catódica ou emissão por campo. Este fenômeno é caracterizado pela formação de um filme (com espessura microscópica) de óxido (+) sobre a superfície do cátodo (-), fornecendo condições mais favoráveis para a emissão de elétron (Scotti e Ponomarev, 2014). Esta fina camada de óxido é formada devido a interação que a maioria dos metais e suas ligas, industrialmente utilizados, estão sujeitos com o meio à sua volta quando este possui agentes oxidantes, tais como oxigênio e vapor d'água (Frauches-Santos et al., 2013; Gentil, 1996). Esta interação química corresponde a transferência de elétrons entre os reagentes, ou seja, um elemento irá perder elétrons (oxidação) e o outro irá ganhar elétrons (redução) (Jardim e Canela, 2004).

Segundo Scotti e Ponomarev (2014) o filme óxido localizado na poça de fusão e ao redor possui, normalmente, uma ligação elétron-átomo mais fraca que a do metal de base, por onde os elétrons são mais facilmente emitidos. Entre a camada de óxido e o metal de base gera-se um alto gradiente de tensão localizada, que proporciona o agrupamento e aceleração de elétrons em direção ao ânodo, sem a necessidade de um gradiente elevado de tensão entre o eletrodo e a peça. Como consequência dessa aceleração, a camada de óxido é quebrada pelos elétrons que viajam através da coluna de plasma até o ânodo.

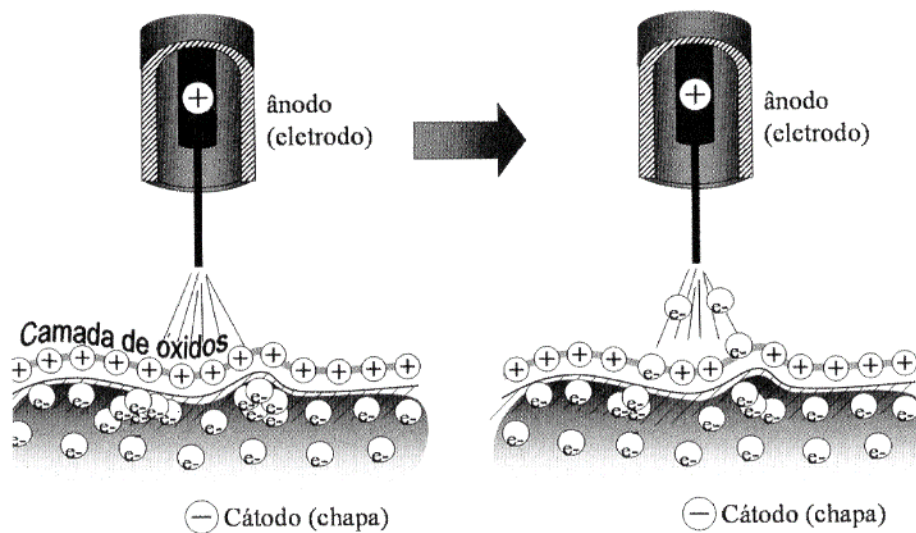


Figura 2.4: Representação esquemática do mecanismo de emissão catódica.

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

Para evitar que o arco elétrico procure por óxidos em regiões muito distantes, gerando assim uma instabilidade do arco, existe a necessidade da regeneração da camada de óxido quebrada. Sendo assim, realizam-se adições de gases oxidantes (O_2 e/ou CO_2) na mistura de proteção para soldagem de aços com baixa facilidade de oxidação, evitando instabilidades no arco. Como uma atmosfera oxidante é fundamental para que ocorra a regeneração da camada de óxido, gases inertes puros (Ar ou He) não devem ser utilizados para a proteção desses aços. Já para os metais altamente reativos (se oxidam facilmente) como o Ti, Mg e Al, essa atmosfera protetora oxidante não se faz necessária. Pode-se então, verificar a importância do potencial de oxidação (seção 2.2.1.4) do gás de proteção utilizado no processo GMAW. (Scotti e Ponomarev, 2014; Modenesi, 2012).

2.2 Gases de proteção

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

As propriedades químicas e físicas do gás tais como potencial de ionização, condutividade térmica, densidade, potencial de oxidação, entre outras, são responsáveis em determinar, em grande parte, as características do arco elétrico e as propriedades das soldas. Sendo assim, variáveis como tensão, perfil térmico, eficiência do arco e energia de soldagem são profundamente influenciados pela composição química do gás de proteção (Marques et al., 1998).

2.2.1 Propriedades químicas e físicas dos gases de proteção

2.2.1.1 Dissociação e ionização

Para o arco elétrico se sustentar, é necessário que existam partículas eletricamente carregadas disponíveis na região entre o eletrodo e a peça. As moléculas de qualquer gás presente neste espaço deverão ser dissociadas. Devido à elevada temperatura nesta região, o gás é aquecido, resultando no aumento da energia vibracional das moléculas. Conforme o gás é aquecido, essa energia aumenta, podendo tornar-se suficiente para que ocorra a quebra da ligação entre os seus átomos, ou seja, dissociação. Considerando o hidrogênio como exemplo, pode-se observar a dissociação de sua molécula na Equação 2.1, que é realizada de acordo com a Equação 2.2 (Modenesi, 2012; Su, 2007; Machado, 1996).



$$\frac{4x^2}{1-x^2} = \frac{p_0}{p} \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right) \quad \text{Equação 2.2}$$

onde:

- x é a fração dissociada do gás (adimensional);
- p , p_0 são as pressões em que o gás se encontra e a pressão atmosférica, respectivamente (atm);
- ΔG é a energia livre de formação (J/mol);
- R é a constante dos gases (8,31 J/mol.K);
- T é a temperatura (K);

Em temperaturas ainda mais elevadas e após o processo de dissociação, ocorre a expulsão de um elétron das camadas mais externas dos átomos, processo conhecido como ionização. Aumentando-se ainda mais a temperatura mais elétrons podem ser expulsos, ocorrendo a ionização múltipla. Novamente tendo como exemplo o hidrogênio, verifica-se o processo de ionização na Equação 2.3 e uma estimativa da variação do grau de ionização com a temperatura que pode ser feita pela Equação 2.4, conhecida como equação de Saha (Modenesi, 2012; Su, 2007; Machado, 1996).



$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = \frac{p_0}{p} CT^{5/2} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad \text{Equação 2.4}$$

onde:

- α é o grau de ionização/fração ionizada (adimensional);
- p , p_0 são as pressões em que o gás se encontra e a pressão atmosférica, respectivamente (atm);
- C é uma constante de proporcionalidade ($1,264 \times 10^{-6}$ kg/J.s);
- T é a temperatura (K);
- E_i é a energia de ionização (eV);

Tanto a dissociação como a ionização necessitam uma quantidade de energia, vinda do arco elétrico, para ocorrerem. Ou seja, são fenômenos endotérmicos. Os gases ionizados e/ou dissociados quando chegam na região catódica (relativamente fria) se recombinam liberando energia (processo exotérmico), afetando a formação do cordão de solda (Khalaf, 2011; Modenesi, 2009; Scotti e Ponomarev 2014).

2.2.1.2 Potencial de ionização

A facilidade de abertura e estabilidade do arco elétrico está relacionada ao menor potencial de ionização do gás de proteção (AWS, 2001). O potencial de ionização (PI) é a energia em elétron volts (eV) necessária para remover um elétron de um átomo à uma distância infinita, tornando-o um íon (Groetelaars e Scotti, 2007; Arroio et al., 2010). A Tabela 2.1 exibe o potencial de ionização dos gases de proteção comumente utilizados em soldagem.

Tabela 2.1: Potencial de ionização dos gases de proteção mais utilizados em soldagem.

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

Fonte: Adaptado de Scotti e Ponomarev (2014)

Conforme ilustrado na tabela acima, o potencial de ionização do He é maior que a do Ar, logo exige-se maior energia para ionizar o He. Portanto, a iniciação do arco é mais fácil e a queda de tensão é menor com o Ar (Kou, 2003). Ainda comparando esses dois gases, segundo Scotti e Ponomarev (2014), para uma mesma corrente e mesmo comprimento de arco, a tensão é maior para o He quando comparado ao Ar.

2.2.1.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos gases é uma propriedade física que influencia fortemente no modo de transferência metálica e na geometria do cordão de solda (Vaidya, 2002). Esta propriedade está relacionada com a quantidade de calor que um gás consegue transferir para a peça ou ambiente.

Na Figura 2.5 apresenta-se a variação da condutividade térmica de alguns gases de proteção utilizados no processo GMAW em função da temperatura. Observa-se que os gases moleculares (H_2 , CO_2 e O_2) possuem maior condutividade térmica em temperaturas mais baixas, em torno de $3000^\circ C$. Já os gases monoatômicos (Ar e He) possuem sua maior condutividade em torno dos $9000^\circ C$.

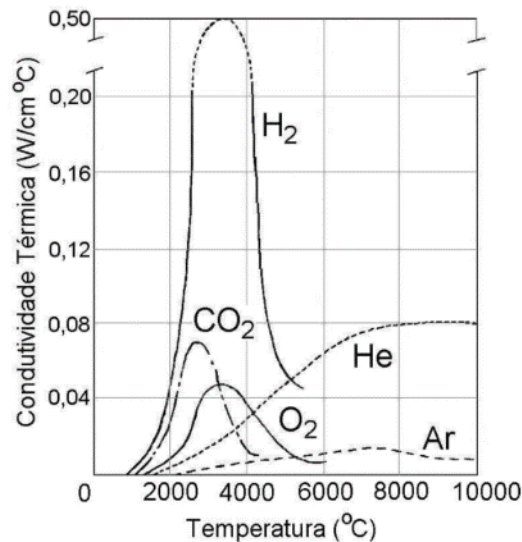


Figura 2.5: Condutividade térmica de alguns gases de proteção em função da temperatura.

Fonte: Adaptado de Suban e Tušek (2001)

Acredita-se que devido a esta propriedade, quando se compara o Ar e o He, o Ar produz uma coluna de plasma com uma concentração maior da energia em sua região interna, ou seja, existe um gradiente de temperatura elevado quando se compara o centro da coluna com as regiões periféricas, produzindo um perfil do cordão de solda com penetração centralizada. Por outro lado, a coluna de plasma formada pelo He possui a energia mais uniformemente distribuída no sentido radial da coluna de plasma, resultando em um perfil do cordão de solda mais distribuído (Morales et al., 2007; Vaidya, 2002).

Segundo a AWS (2004) a soldagem a arco com proteção gasosa feita pelo He produz um cordão de solda com perfil amplo e parabólico. Já a soldagem protegida por Ar produz um cordão de solda estreito e profundo (tipo cálice), conforme pode ser observado na Figura 2.6.

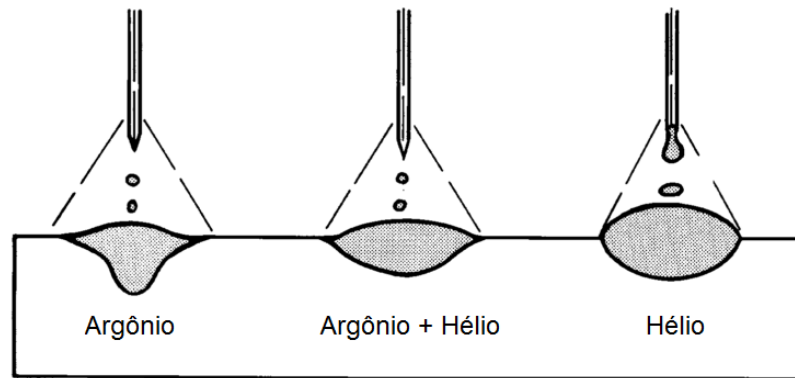


Figura 2.6: Perfis típicos dos cordões de solda para Argônio e Hélio.

Fonte: Adaptado de AWS (2004)

Porém, segundo Scotti e Ponomarev (2014), a condutividade é apenas um dos fatores que influenciam a geometria do cordão, a ação mecânica da gota fundida em transferência também é um fator importante. Tem-se como exemplo que no processo de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG), também conhecido como *Gas-Shielded Tungsten Arc Welding* (GTAW), não se observa o perfil tipo cálice utilizando Ar puro.

2.2.1.4 Potencial de oxidação

Conforme mencionado anteriormente, o Potencial de Oxidação (PO) do gás de proteção na soldagem do aço é fundamental para que haja a regeneração da camada de óxido sobre a superfície do cátodo, que é destruído pela emissão de elétrons no processo de emissão catódica. Costa et al. (2009) reiteram essa teoria concluindo, em seu trabalho sobre a utilização de gases de proteção com baixo potencial de oxidação, que instabilidades no arco elétrico foram geradas devido a alteração no mecanismo de emissão de elétrons.

Modenesi e Nixon (1994) relataram, para soldagem pelo processo GMAW em aço baixo carbono, fenômenos de instabilidade que estavam associados ao potencial de oxidação dos gases de proteção. Observaram que a adição de um componente oxidante na mistura de proteção melhorou o perfil do cordão de solda e a estabilidade do arco.

Pode-se relacionar empiricamente o potencial de oxidação de acordo com o percentual volumétrico de CO_2 e O_2 presentes na atmosfera de proteção através da Equação 2.5.

$$PO = \%O_2 + \left(\frac{\%CO_2}{2}\right) \quad \text{Equação 2.5}$$

De acordo com a equação acima, o potencial de oxidação do CO₂ corresponde à metade do O₂ quando presente em mistura no gás de proteção. Como resultado, encontra-se em misturas comerciais um baixo percentual de O₂ em relação ao CO₂. Porém, segundo Resende et al. (2009) em seu trabalho sobre a influência desses gases na corrente de transição globular-goticular, esta proporção de duas vezes o percentual de CO₂ em relação ao O₂ apresentou uma pior correlação do que somando-se os percentuais diretamente, sem dividir por dois o percentual do CO₂.

Segundo Scotti e Ponomarev (2014), assim como um PO insuficiente causa transtornos no processo de soldagem, tais como: reduzir a estabilidade do arco e a molhabilidade (relação entre a tensão superficial do metal fundido e o metal de base) e favorecer a formação de cordões irregulares e convexos, um PO demasiadamente elevado também causa transtornos, similares aos que a falta de proteção proporciona, por exemplo: poros, fragilização do metal de solda, perda significativa de elementos de liga, aumento na emissão de fumos, alteração das propriedades mecânicas, entre outros.

É importante salientar que existe uma forte relação entre o potencial de oxidação e os elementos desoxidantes presentes no arame-eletrodo. Quanto maior o potencial de oxidação, mais desoxidantes devem estar presentes no arame, resultando em maior quantidade de fumos. Os desoxidantes mais utilizados para soldagem de aço carbono são o manganês (Mn) e o silício (Si). Estes elementos possuem maior tendência a reagirem com o O₂, formando óxidos, do que o Fe. Estes óxidos, conhecidos na soldagem como escória, ficam na superfície do cordão de solda após a solidificação sendo facilmente removidos. Caso haja uma relação inapropriada entre estes dois fatores, como um arame com alto teor de desoxidantes e um gás com baixo potencial de oxidação, os elementos desoxidantes podem ir para o cordão como elementos de liga (teores elevados de Si fragilizam o aço). Em uma situação oposta, ou seja, um baixo teor de desoxidantes com um alto potencial de oxidação espera-se porosidade ou propriedades mecânicas inapropriadas devido a remoção de elementos de liga do aço (Scotti e Ponomarev, 2014).

2.2.1.5 Densidade relativa

A densidade relativa do gás em função do ar atmosférico exerce a principal influência sobre a efetividade de proteção do mesmo, sendo esta a sua primeira função (AWS, 2004). A Tabela 2.2 exibe a densidade dos gases de proteção comumente utilizados em soldagem.

Tabela 2.2: Densidade dos gases de proteção mais utilizados em soldagem.

Gás	Ar	CO ₂	He	H ₂	N ₂	O ₂
Densidade (Kg/m ³)	1,78	1,98	0,18	0,07	1,16	1,13

Fonte: Adaptado de Scotti e Ponomarev (2014)

Quando o gás de proteção é mais denso que o ar atmosférico (densidade aproximada de 1,2 Kg/m³), o mesmo apresenta maior eficiência para proteger a região de solda quando esta se localiza abaixo do bocal da solda, ou seja, posição plana (a Figura 2.7 ilustra as posições de soldagem em chapas). Isso ocorre pois esses gases formam uma espécie de cobertor sobre a área de soldagem. Sendo assim, na posição plana, os gases de proteção mais densos necessitam de uma menor vazão do que os menos densos para assegurar a eficiência de proteção. Esse raciocínio se inverte quando considera-se a posição de soldagem sobre-cabeça. Neste caso, quanto menos denso o gás, maior será sua eficiência de proteção. Já nas posições de soldagem horizontal e vertical, a densidade alta ou baixa do gás não favorecem a proteção, sendo sugerido aumentar o fluxo de gás um pouco acima da recomendada. (AWS, 2004; Scotti e Ponomarev, 2014).

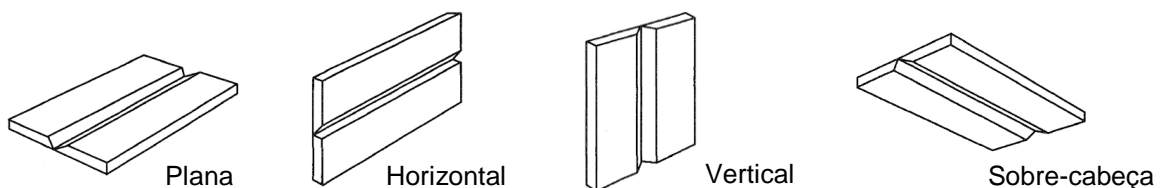


Figura 2.7: Posições de soldagem em chapas.

Fonte: Adaptado de AWS D1.1 (2000)

2.2.2 Gases de proteção utilizados no processo GMAW

Segundo Irving (1999), o gás de proteção é responsável por apenas 3% do custo total na soldagem de aço carbono, sendo a maior parte desse custo (77%) destinado a mão de obra. A escolha adequada do gás de proteção pode levar a uma maior qualidade e produtividade, assim como uma economia considerável.

Em seu trabalho sobre as tendências no desenvolvimento de gases de proteção, Tatagiba, Gonçalves e Paranhos (2012) observaram que o modelo de atmosfera oxidante do gás de proteção para o processo GMAW predomina por mais de trinta anos nas misturas gasosas, que variam bastante, contudo continuam à base de Ar, He, CO₂ e O₂. Em algumas aplicações específicas observou-se também o uso de H₂, N₂ e NO, o que está de acordo com o apresentado na norma AWS A5.32M (2011). Demonstrando pouca inovação no desenvolvimento de novas formulações de gases de proteção, ao contrário dos equipamentos de soldagem, no qual observou-se grande inovação. Porém, trabalhos utilizando gases distintos dos já mencionados também foram encontrados, mas sem aplicação industrial.

Na Tabela 2.3 lista-se as composições dos gases de proteção e o resumo dos resultados obtidos com estes, apresentados em trabalhos científicos e requeridos em patente.

Tabela 2.3: Formulações de gás de proteção para soldagem a arco elétrico.

Ano	Gás de Proteção	Resultados	
1960	Ar/He 1-20%CO ₂ /CO	Material: aço carbono (<0,35%C). Obtenção de um cordão de solda muito liso e uniforme. Particularmente quando é adicionado CO ₂ à mistura.	
1964	Ar e/ou He. 20-70% CO ₂ /CO 1-15% O ₂	Material: aço carbono. Formação de uma poça de solda que associa a boa penetração fornecida pelo gás CO ₂ com a boa largura de cordão fornecida pelo Ar.	
1970	He 40-60%Ar 1-15%CO ₂	Ar 1-15%CO ₂ 60-80%He	Material: aço carbono. Possibilidade de realizar soldas em todas as posições, obtendo adequadas propriedades de resistência mecânica e tenacidade.
1986	65-95% He 1,75-2,25%CO ₂ 0,25- 1%O ₂	Material: aço carbono. Solda livre de escória e com uma superfície mais limpa.	
1988	71-83%Ar 16%-25% He 1-4%CO ₂	Material: aço inoxidável, aços de baixa liga, ligas a base de Ni e metais não ferrosos. Utilizando-se gás de proteção com esta composição, a taxa de deposição de metal é aumentada, com a entrada de energia reduzida, na soldagem por arco pulsado, em operações de soldagem fora de posição.	
1989	He 3-8%CO ₂ 30-40%Ar	Material: aço carbono. Melhorou a deposição sobre o metal base em virtude da transferência metálica ser por spray.	

1990	Ar 0,5-1,25%CO ₂ 30-40%He		Material: aço carbono, aço inoxidável, metais não ferrosos. Produz uma solda com aparência superior à obtida com outras misturas, com aspecto liso e com pouca ou nenhuma oxidação, sem instabilidade do arco. A taxa de transferência metálica é alta.
1991	20-65%Ar 30%CO ₂ 5-20%He		Material: aço carbono. Com esta composição do gás de proteção é possível o uso de correntes de até 1000 A, mantendo boa densidade e um formato satisfatório do cordão. Com essas misturas houve baixa formação de respingos e liberação de fumos. A melhor aparência da solda é obtida com correntes maiores que 600 A.
1992	Ar 0,1-0,9%CO ₂ 5%-12% He		Material: Super ligas a base de Ni, Co. Capacidade de soldar com uma grande variedade de modos de transferência metálica com a estabilidade do arco excelente, perfil do cordão e a aparência adequada. As características do arco são mantidas de forma a não produzir oxidação excessiva do metal de solda.
1996	Ar 2-20%O ₂		Material: aço carbono, aço inoxidável. A adição de O ₂ aumentou a taxa de transferência metálica, que variou de acordo com a corrente utilizada, promovendo a formação de um cordão de solda de melhor qualidade.
2001	96%Ar 3%CO ₂ 1%O ₂		Material: aço carbono, aço inoxidável. Obtém-se transferência metálica por curto-circuito, por spray entre outras. Com esta composição não ocorre alteração significativa da química do metal de solda.
2002	Ar		Material: aço carbono, aço inoxidável. O arco de soldagem apresenta-se bastante instável. A solda não tem molhabilidade adequada e são produzidas descontinuidades.
	Ar CO ₂ O ₂		Material: aço carbono, aço inoxidável. O ₂ melhora a fluidez, molhamento e penetração do cordão de solda. Além da estabilização do arco, as adições progressivas contribuem para a perda de elementos de liga através do arco. Adições de CO ₂ aumentaram as emissões de fumos de soldagem.
2002	Ar 0,01-1,80%O ₂ 20-98,2% He		Material: Al e suas ligas. Transferência por spray, sem corrente pulsada. Proporciona uma elevada produtividade devido à velocidade de soldagem de 110 cm/min em corrente contínua e 105 cm/min em corrente alternada. As juntas soldadas apresentam um baixo nível de inclusões de alumina, e adequadas propriedades mecânicas.
2007	Ar 6-10%CO ₂ 6-10%He		Material: aço revestido, galvanizado e aço aluminizado. Obteve-se transferência metálica por curto-circuito e por spray. Pode ser aplicada com posição de soldagem horizontal ou plana. Promoveu menor quantidade de respingos e porosidade. Cordão de solda com melhor aparência.
2009	97.5% Ar 2.5% CO ₂	82% Ar 18% CO ₂	Material: aço carbono. Com o aumento da porcentagem de CO ₂ no gás de proteção, se verificou o aumento na penetração da solda e a diminuição na quantidade de inclusões.
	90% Ar 10% CO ₂	75% Ar 25% CO ₂	
2009	Ar 1%O ₂		Material: aço carbono. Em condições com baixa corrente o arco elétrico é instável, com transferência metálica globular e grande formação de respingos. Nos períodos de alta corrente, a transferência por spray foi estável, ocorrendo baixa formação de respingos e um arco mais longo. O processo foi instável e após cerca de 3 a 6 s, tornou-se estável. Esta transição foi caracterizada por um aumento no comprimento do arco (de 4 mm) e da corrente (entre 50-100 A).
2010	Ar 20-30%CO ₂ 12-15%O ₂		Material: aço galvanizado. Na soldagem de ângulo, de uma folha, usando essa composição do gás de proteção é possível obter uma velocidade de soldagem de até 125 cm/min.

Fonte: Tatagiba, Gonçalves e Paranhos (2012)

A classificação do gás ou mistura de proteção é de acordo com a sua reatividade, podendo ser inertes ou ativos. Os ativos ainda se subdividem em oxidantes, redutores e de baixa reatividade. Sendo o Ar e o He considerados inertes, CO₂ e O₂ oxidantes, N₂ de baixa reatividade e o H₂ redutor (AWS A5.32M, 2011). Segundo Nadzam et al. (2011), os gases inertes são aqueles que não interagem quimicamente com o metal de solda, já os ativos possuem uma reatividade química controlada para produzirem características desejadas. Esses gases são normalmente misturados, com o objetivo de obter-se propriedades associadas a cada um deles em uma mistura de proteção.

2.2.2.1 Argônio (Ar)

O Ar é um gás incolor, inodoro e insípido. Não é inflamável e nem tóxico. Por não reagir quimicamente com outros elementos é classificado como inerte. O argônio é obtido da atmosfera, entretanto ele está presente nesta em uma quantidade de apenas 0,934%. Devido a sua elevada densidade em relação ao ar, ele promove com eficiência a proteção da região de soldagem. Além disso, o Ar facilita a iniciação do arco elétrico, assim como a estabilidade deste (Tušek e Suban, 2000).

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

2.2.2.2 Hélio (He)

O He também é um gás quimicamente inerte, incolor, inodoro e insípido. Não é inflamável e nem tóxico. Comercialmente não é extraído da atmosfera, mas sim de reservas de gás natural existentes em poucos países, o que justifica o seu custo elevado em relação ao Ar. Diferentemente do Ar, o He possui um elevado potencial de ionização, o que dificulta a ignição do arco elétrico e a estabilidade deste além de

exigir uma maior tensão de soldagem que o Ar para uma mesma corrente e comprimento do arco (Scotti e Ponomarev, 2014; White Martins, 2010).

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

2.2.2.3 Dióxido de carbono (CO₂)

O CO₂ é o único gás ativo utilizado puro para proteção de soldas realizadas em aço carbono e baixa liga, os demais são utilizados em misturas com gases inertes. Este gás é amplamente utilizado na soldagem GMAW devido as suas características de promover alta velocidade de soldagem, maior penetração e baixo custo inicial. (Kah e Martikainen, 2013; Stenbacka e Persson, 1989;).

A adição progressiva de CO₂ na mistura de proteção à base de Ar aumenta a penetração e a largura do cordão de solda e diminui o reforço. Porém, gera maior quantidade de fumos, escória e respingo, além de remover elementos de liga presentes no metal de solda, exigindo assim um eletrodo com teores elevados de desoxidantes. Todos esses fatores influenciam no custo final da solda, ou seja, o baixo custo do gás, justificativa para a utilização de 100% deste na proteção, não corresponde necessariamente a um baixo custo por metro de solda depositado e é amplamente variável de acordo com a aplicação (Liskevych e Scotti, 2015; Vaidya, 2002; AWS, 2011).

Segundo Baixo e Dutra (1989) a elevada quantidade de respingo gerada pelo CO₂ pode ser associada com a constrição do plasma por causa da elevada condutividade térmica deste, causando uma diminuição da área de interface com a extremidade inferior da gota fundida. Devido a este efeito de constrição e da natureza oxidante da atmosfera, ocorre o desequilíbrio das forças eletromagnéticas que atuam sobre a gota em sua fase de crescimento e surgem forças repulsivas, consequência da vaporização de óxidos que conduzem a gota em movimento oscilatório, conduzindo a salpicos caso o glóbulo esteja em posição desfavorável.

2.2.2.4 Oxigênio (O₂)

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

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

2.2.2.5 Nitrogênio (N₂)

Misturas de proteção contendo N₂ não são recomendadas para a soldagem de aço carbono. Em pequenas porcentagens (até 3%) o nitrogênio tem aplicação em misturas especiais para soldagem de aços inoxidáveis, pois permite a transferência desse elemento para a solda podendo ser benéfico. Assim como o H₂, o N₂ possui uma elevada entalpia gerando uma transferência de calor para a solda mais intensa, porém pode dar origem a poros (AWS, 2011; Scotti e Ponomarev, 2014).

Conforme aumenta-se o percentual de nitrogênio no gás de proteção, sua participação no metal de solda também aumenta. Ele funciona como um estabilizador da austenita no aço inoxidável, quanto mais nitrogênio estiver presente no metal de solda, maior será a formação da austenita e menor será o tamanho e a quantidade de ferrita. Em solução sólida, é um elemento de liga benéfico que permite o aumento da resistência sem perda significativa da ductilidade e dureza, além da possibilidade de aumentar a resistência ao escoamento em praticamente duas vezes. Porém, quando o teor de nitrogênio no gás de proteção excede um valor crítico ocorre a formação de poros (Lin et al., 2007).

2.2.2.6 Hidrogênio (H₂)

O H₂ é incolor, inodoro, insípido, não tóxico e é o gás mais leve (menor densidade) encontrado no ar, em quantidade aproximada de apenas 100 ppm (0,01%). Ele apresenta um comportamento inflamável e explosivo em mistura com o ar ou oxigênio em uma ampla faixa de valores (Suban et al., 2001).

Devido à elevada condutividade térmica do hidrogênio, quando se adiciona este ao argônio como gás de proteção, o arco elétrico se torna mais estreito e aumenta a concentração da energia no mesmo, resultando em maior penetração da solda. Como é um gás redutor, ele diminui a formação de óxidos na camada final da solda e conseqüentemente gera uma melhor aparência. Entretanto a adição de H₂ pode trazer problemas como poros e trincas devido à alta solubilidade que este apresenta em metais fundidos (Tušek e Suban, 2000).

Ainda de acordo com a pesquisa experimental de Tušek e Suban (2000), sobre o efeito do hidrogênio no argônio como gás de proteção na soldagem a arco de aços inoxidáveis de alta liga, pode-se afirmar que no processo GMAW a taxa de deposição e a eficiência de fusão aumentam à medida que se eleva o percentual de H₂ na mistura. Porém esses efeitos são menos pronunciados no GMAW que no GTAW.

Gülenç et al. (2005) indica que os valores de dureza do metal de solda diminuem com a adição de H₂ no Ar como mistura de proteção para aço inoxidável austenítico. Fato este relacionado à entrada excessiva de calor, que é associado com a condutividade térmica elevada do hidrogênio. Uma entrada de calor elevada resulta em um maior tempo de resfriamento da peça, ou seja, a velocidade de resfriamento é menor diminuindo assim a dureza do metal de solda.

Porém, de acordo com Tatagiba (2015) e Menezes (2016), a influência do H₂ na dureza do aço baixo carbono não é significativa, pois obtiveram valores semelhantes para os gases convencionais e suas respectivas misturas com H₂. Esses resultados estão associados à falta de alteração significativa nas microestruturas encontradas.

Pode-se observar, através do diagrama Transformação em Resfriamento Contínuo (TRC) na Figura 2.8, que quanto mais rápido é o resfriamento do metal fundido, maior é o valor de dureza (valores circulados) devido a formação de microestruturas fora do equilíbrio.

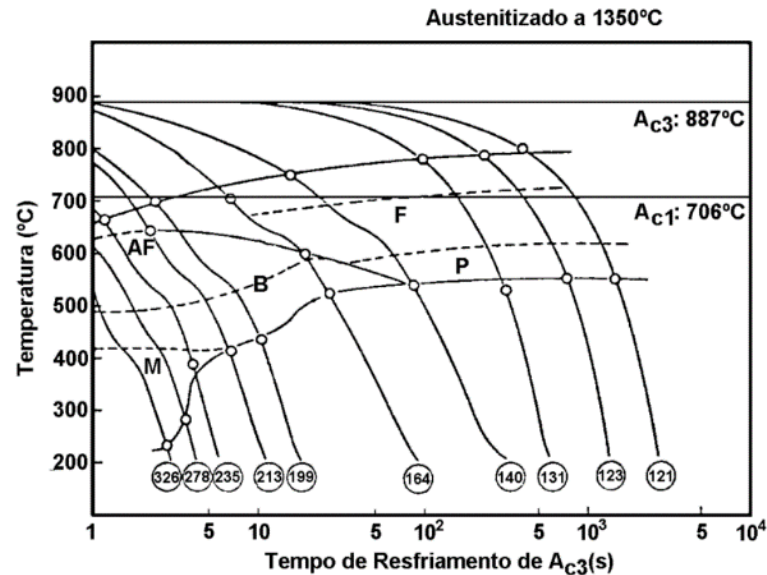


Figura 2.8: Exemplo de diagrama TRC da ZF.

Fonte: Modenesi (2004)

Realizando uma análise quantitativa, Menezes (2016) mostrou que a quantidade de respingos gerados é menor quando se adiciona H₂ nos gases Ar+25%CO₂ e CO₂. Entretanto, a quantidade de escória foi maior para o gás contendo H₂ em relação ao seu respectivo gás comercial. Fato este atrelado à possível mudança na distribuição de temperatura do arco elétrico, concentrando uma quantidade maior de energia em uma região pontual o que pode ter facilitado a formação de óxidos na superfície.

2.3 Modos de transferência metálica

Um dos fenômenos mais característicos do processo GMAW é o modo pelo qual o metal fundido se transfere da ponta do arame-eletrodo para a poça de fusão através do arco elétrico. Diferentes modos de transferência metálica podem ser observados de acordo com o tempo de crescimento, dimensão e frequência de destacamento da gota. Os principais parâmetros que influenciam no modo de transferência são: composição do gás de proteção, diâmetro e composição do arame, comprimento do arco e a magnitude, polaridade e tipo de corrente utilizada (Scotti et al., 2012; AWS, 2004).

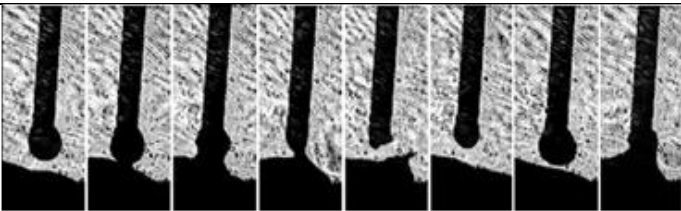

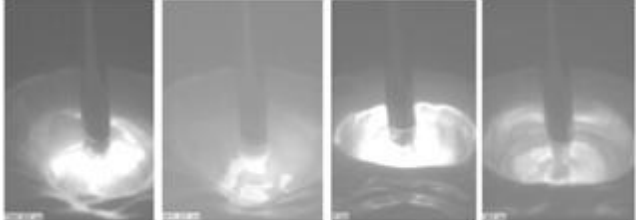
O modo de transferência metálica influencia a estabilidade do processo, a possibilidade de soldagem em diferentes posições, a qualidade, geometria e

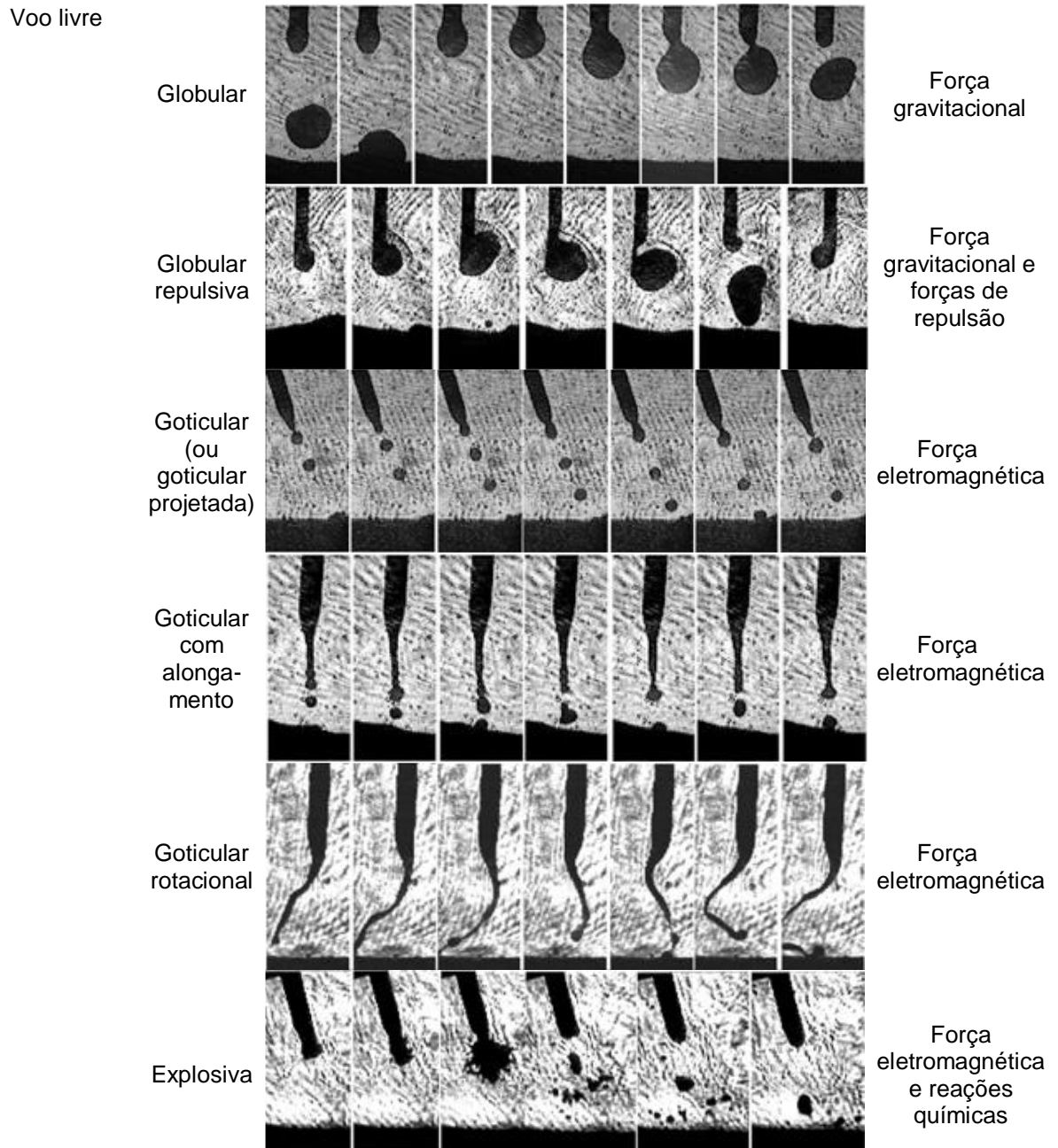
aparência final do cordão de solda, além de influenciar fortemente na quantidade de respingos gerados (Scotti e Ponomarev, 2014).

Diversas técnicas são utilizadas para o estudo da transferência metálica. As técnicas mais usuais podem ser agrupadas em três categorias básicas: métodos mecânicos, fotográficos e através de medição de efeitos secundário. Os métodos mecânicos consistem no recolhimento, utilizando algum artifício, das gotas de metal de adição. Os métodos fotográficos utilizam-se de imagens obtidas em alta velocidade para observar os processos que ocorrem durante a transferência metálica. Filtros e lasers especiais podem ser utilizados para reduzir o ofuscamento causado pelo arco, como na técnica de perfilografia. Já os métodos indiretos baseiam-se nas medições e análises de sinais relativos ao processo de transferência como corrente, tensão, luminosidade e emissão acústica (Modenesi, 2012).

Os modos de transferência metálica naturais são aqueles que ocorrem espontaneamente, ou seja, eles não são forçados por parâmetros elétricos ou controle de alimentação do arame. As variações desses modos estão listadas, em conjunto com as forças governantes principais para o destacamento da gota, na Tabela 2.4 (Scotti et al., 2012).

Tabela 2.4: Modos de transferência naturais do processo GMAW.

Classe de transferência	Modos de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Contato	Por curto-circuito		Tensão superficial e efeito <i>pinch</i>
	Por "ponte"		Tensão superficial
	Por curto-circuito forçado		Efeito <i>pinch</i> pronunciado



Fonte: Adaptado de Scotti et al. (2012)

Dentre os modos naturais de transferência, classicamente considera-se três formas como principais, à saber: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência goticular (Modenesi, 2012). A Figura 2.9 esquematiza os campos operacionais estáveis desses modos de transferência. No presente trabalho, apenas estes modos básicos de transferência serão descritos com mais detalhes, com um enfoque maior no curto-circuito devido à área de investigação.

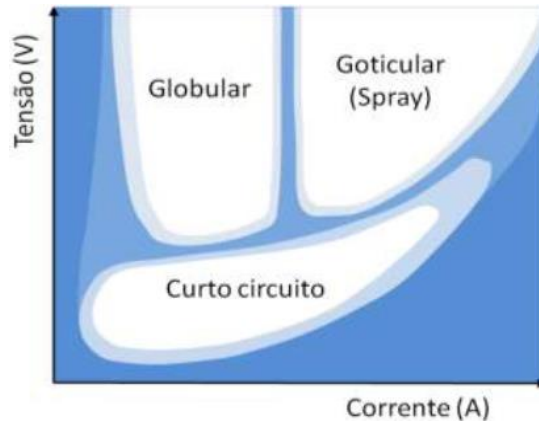


Figura 2.9. Modos naturais de transferência em função da tensão e corrente na soldagem GMAW.

Fonte: Modenesi (2012)

Com a inovação extensiva nos equipamentos de soldagem, estes passaram a realizar o controle da transferência metálica. Dessa forma, surgiram os modos controlados de transferência metálica. Este controle é através da modulação do sinal de corrente visando a otimização de características favoráveis de cada modo de transferência. O controle pode ter objetivos distintos, tais como garantir uma transferência metálica mais uniforme (redução de respingos e melhores aspectos visuais do cordão), poça de fusão pequena (facilita a soldagem e passe de raiz ou chapas finas) e obter uma relação penetração/taxa de deposição controlada (Scotti e Ponomarev, 2014).

Existe ainda a classe de modos intercambiáveis, onde ocorrem dois ou três modos naturais de forma intercalada, sequencial e repetitiva sem que ocorra a intervenção do operador ou controle do equipamento. As faixas de ocorrência dessas transferências situam-se, normalmente, entre os modos tradicionais, sendo possível apenas quando ocorre uma combinação de parâmetros favoráveis como corrente de soldagem, gás de proteção, distância bico de contato-peça e comportamento dinâmico da fonte de energia. Os modos intercambiáveis não são obtidos quando a proteção gasosa possui mais que 12%CO₂ (Scotti et al., 2014; Scotti, 2000).

A Figura 2.10 apresenta os modos de transferência metálica de acordo com sua classificação.

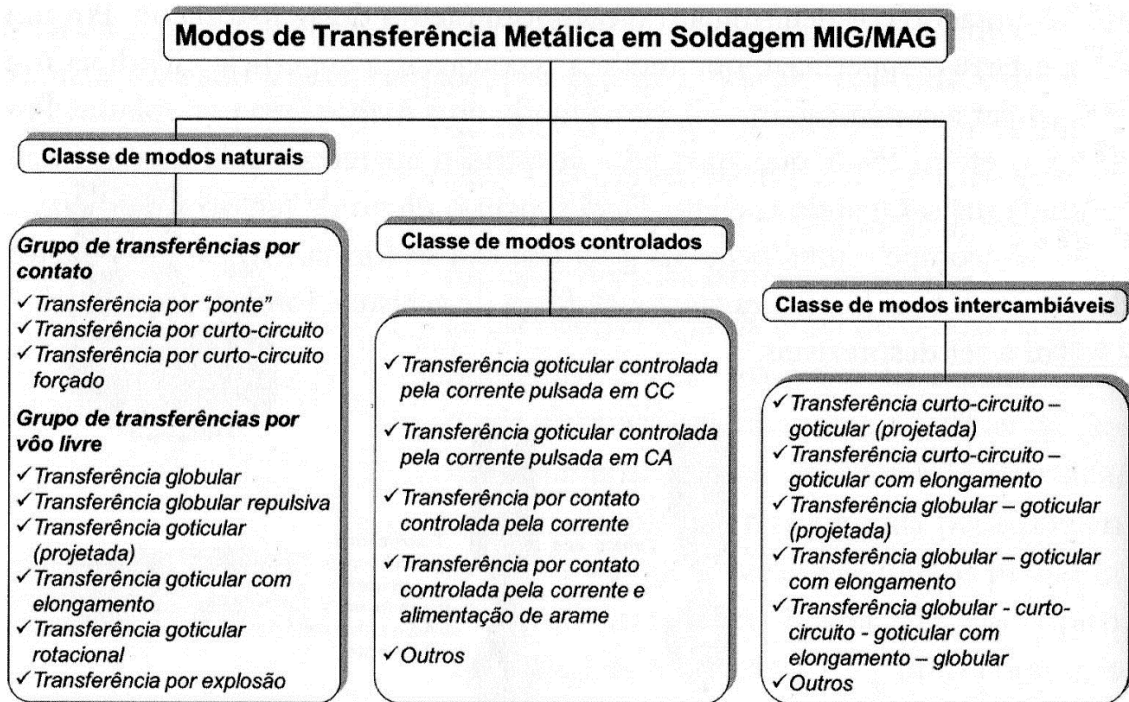


Figura 2.10: Classificação dos modos de transferência metálica.

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

2.3.1 Transferência por curto-circuito

A transferência metálica por curto-circuito é caracterizada pelo arco suficientemente curto, devido à baixa tensão utilizada, para que a gota em formação tenha contato (curto-circuito) com a poça de fusão antes de se destacar do arame-eletrodo. Ou seja, a ponta do eletrodo atinge periodicamente a poça de fusão, extinguindo momentaneamente o arco elétrico (20 a 200 vezes por segundo). Durante o curto-circuito a corrente de soldagem se eleva abruptamente gerando uma maior fusão do eletrodo por efeito Joule, e a gota do metal fundido tende a ser transferida para o metal de solda por efeito da tensão superficial e do efeito *pinch* (seção 2.3.4). A transferência pode ocorrer de forma mais ou menos violenta de acordo com a indutância. Uma indutância muito baixa (elevada taxa de subida e descida da corrente) acarreta em uma separação brusca da gota podendo gerar respingos. Por outro lado, uma indutância alta (baixa taxa de subida e descida da corrente) pode fazer com que a ponta do arame-eletrodo toque a poça de fusão antes que a gota se rompa, podendo gerar um apagamento permanente do arco (Modenesi, 2012; Scotti e Ponomarev, 2014).

A transferência do metal ocorre apenas no período em que o arame-eletrodo com a gota fundida em sua extremidade tem contato com a poça de fusão, ou seja, o metal é transferido apenas no momento do curto-circuito, não havendo transferência metálica através do arco (AWS, 2004).

Na Figura 2.11 tem-se um oscilograma de corrente (I_w) e tensão (U_a) característico do modo de transferência por curto-circuito. Quadros da região de soldagem sincronizados com o oscilograma e o comportamento do comprimento do arco (L_a) também são mostrados.

No trecho A, o arco está aberto com um determinado valor de tensão e uma corrente mínima. Nessa primeira fase, o eletrodo está se aproximando gradativamente da poça de fusão, reduzindo assim o comprimento do arco elétrico. Isso ocorre até o momento em que a ponta do eletrodo, formada por uma gota fundida ainda presa ao mesmo, toca a poça de fusão (B), ou seja, inicia-se o curto-circuito (extinção do arco). A partir de então, ocorre uma queda abrupta do valor de tensão e inicia-se o aumento da intensidade de corrente e a transferência metálica do eletrodo para a poça. A tensão permanece baixa e a corrente continua a aumentar (C) até que a transferência metálica se dê por completa e ocorra a reignição do arco elétrico (D).

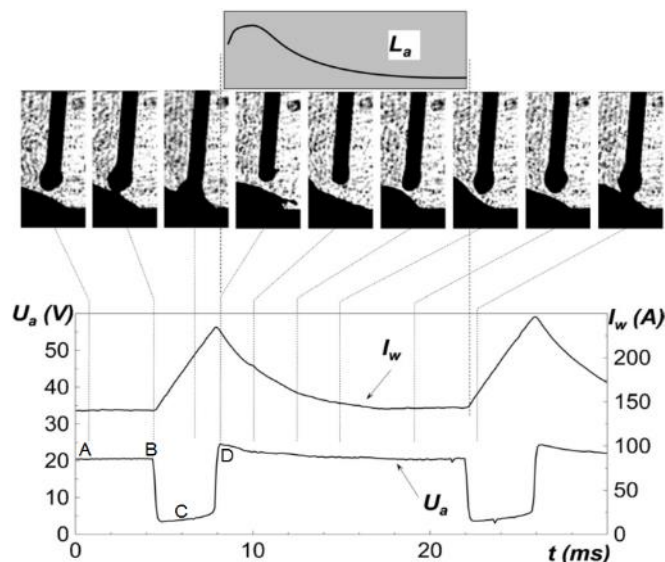


Figura 2.11: Oscilograma típico da transferência por curto-circuito.

Fonte: Adaptado de Scotti et al. (2012)

Em geral, existe um equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame e a taxa de fusão do eletrodo. Porém, imediatamente após o rompimento do curto-circuito

a taxa de fusão se torna maior do que a de alimentação por causa da elevada corrente pós-curto-circuito, dessa forma, o comprimento do arco tende a crescer rapidamente. Contudo, à medida que a corrente diminui, a taxa de fusão se iguala a velocidade de alimentação e em seguida torna-se um pouco menor. Consequentemente, o comprimento do arco tende a diminuir (aproximando-se da poça) enquanto uma nova gota é formada na extremidade do arame até ocorrer um novo curto-circuito e o ciclo se repetir (Modenesi, 2012; Scotti e Ponomarev, 2014).

Devido ao baixo calor transferido para a peça, o curto-circuito é mais comumente utilizado para a soldagem de chapas finas e pode ser utilizado em todas as posições. Ainda assim, vem se utilizando este tipo de transferência para a soldagem do passe de raiz (primeiro cordão de solda) em chapas mais grossas e tubulações mais espessas (Nadzam et al., 2011).

2.3.2 Transferência globular

Este tipo de transferência é caracterizado pela formação de gotas com o diâmetro superior ao diâmetro do eletrodo, que se transferem através do arco elétrico para a poça de fusão com uma baixa frequência (1 a 10 gotas por segundo). Utiliza-se tensões de moderadas a altas (arcos longos o suficiente para evitar o curto-circuito) e correntes baixas (forças eletromagnéticas insignificativas). A medida que a gota aumenta de tamanho na ponta do eletrodo e mantém-se presa a este pelas forças de tensão superficial e de vaporização, o seu peso também aumenta e ocasiona uma transferência irregular para a poça de fusão devido a ação da gravidade, limitando a sua aplicação basicamente à posição plana de soldagem (Bracarense, 2014; Modenesi, 2012; Scotti e Ponomarev, 2014).

A resistência elétrica do circuito vai progressivamente se alterando conforme o crescimento e o destacamento da gota, atribuindo um efeito dinâmico característico ao oscilograma desse modo de transferência. Na Figura 2.12 observa-se o oscilograma e quadros de uma transferência globular com gás de proteção Ar+5%O₂ e arame de aço carbono de $\varnothing = 1$ mm.

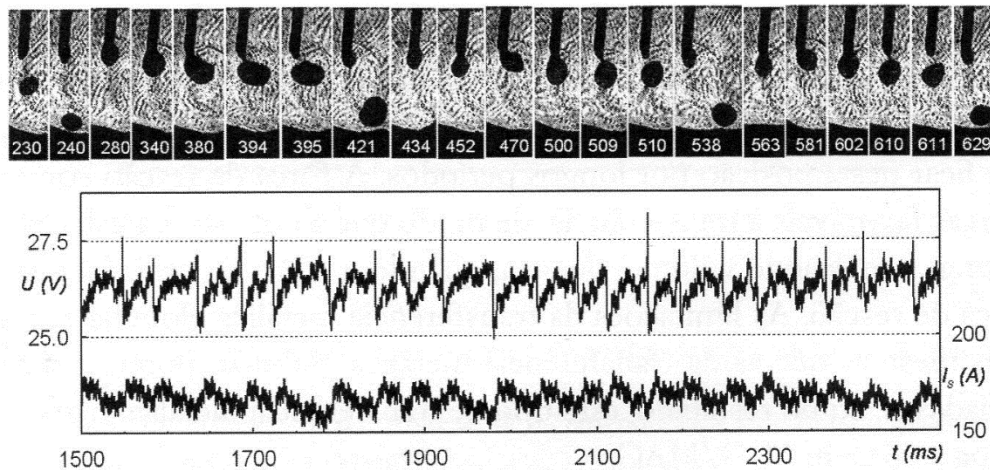


Figura 2.12: Oscilograma típico da transferência globular.

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

2.3.3 Transferência goticular

Conforme a corrente de soldagem na transferência globular aumenta, ocorre uma lenta diminuição do tamanho da gota e um aumento (também lento) da frequência de destacamento, até que a corrente atinge o valor de transição, que na verdade é uma faixa de valores e não um valor único. A partir de então, a diminuição do tamanho da gota e o aumento da frequência que eram lentos, tornam-se abruptos devido a alteração do fenômeno de forças atuantes de forças estáticas para *pinch* (seção 2.3.4), ao mesmo tempo em que o arco passa a envolver a gota completamente (antes estava limitado a parte inferior), com isso, o modo de transferência passa a se chamar goticular. A corrente de transição depende de inúmeros fatores, principalmente do diâmetro e composição do arame-eletrodo, do seu comprimento energizado e do gás de proteção (Resende et al., 2009; Ferraresi et al., 2003; AWS, 2004; Scotti e Ponomarev, 2014). Na Figura 2.13 observa-se a variação brusca do volume e taxa de transferência da gota em função da corrente (corrente de transição), com um eletrodo de aço doce com \varnothing de 1,6 mm, polaridade inversa (CC+), gás de proteção Ar+1%O₂ e comprimento de arco de 6,4 mm.

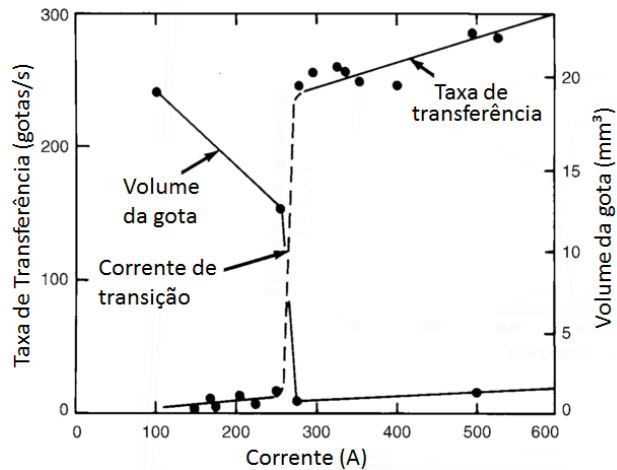


Figura 2.13: Variação da taxa de transferência e volume da gota em função da corrente de soldagem.

Fonte: AWS (2004)

O modo de transferência goticular é caracterizado por gotas do tamanho aproximado do arame-eletrodo sendo transferidos deste para a poça de fusão em uma taxa de centenas de gotas por segundo. A transferência de calor é elevada e regular, sendo a transferência metálica realizada de forma estável (poucas perturbações no arco elétrico), o que pode ser observado através da falta de alterações significativas nos sinais apresentados em seu oscilograma (Scotti et al., 2012). Na Figura 2.14 observa-se o oscilograma e quadros de uma transferência globular com gás de proteção Ar + 2% CO₂ e arame de aço carbono de $\varnothing = 1,2$ mm.

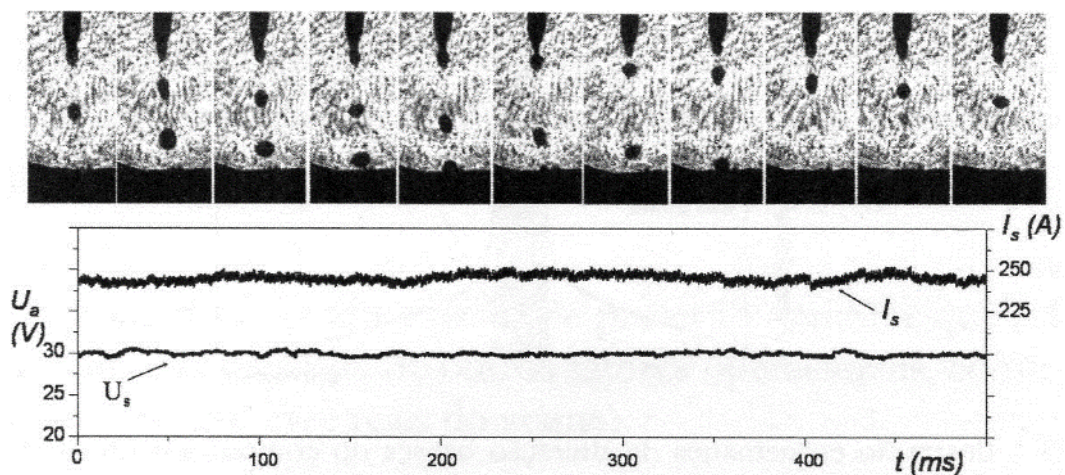


Figura 2.14: Oscilograma típico da transferência goticular.

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

2.3.4 Forças atuantes na transferência metálica

A natureza exata das forças atuantes na transferência metálica ainda não foi extensivamente estudada e quantificada. Esta situação é decorrente da dificuldade em realizar medições na região do arco elétrico devido à sua elevada temperatura e pela dificuldade em evitar uma interferência dos métodos de medição sobre os mecanismos de transferência. Apesar das dificuldades, existem duas teorias prevaletentes: teoria do equilíbrio estático das forças e teoria da instabilidade *pinch* (Baixo, 1999; AWS, 2004).

2.3.4.1 Teoria do equilíbrio estático das forças

Considera-se nessa teoria que há um grupo de forças agindo sobre a gota em transferência, podendo atuar favoravelmente ou não ao seu destacamento. De acordo com Scotti e Ponomarev (2014), as principais forças atuantes são: força gravitacional (F_g), força eletromagnética (F_{em}), força devido à tensão superficial (F_γ), forças de arraste dos gases (F_a) e força de vaporização (F_v), esquematizadas na Figura 2.15.

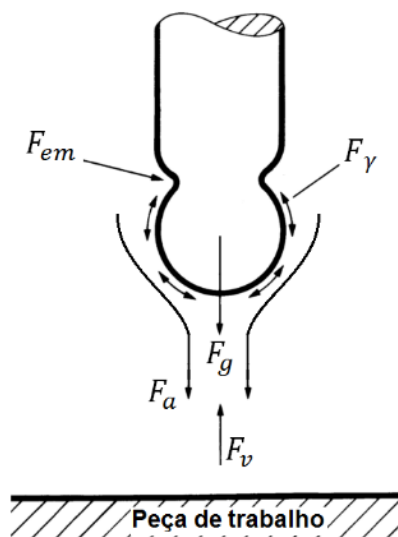


Figura 2.15: Representação esquemática das forças atuantes na gota em transferência.

Fonte: Adaptado de Radaj (2012)

A gota se destaca do arame-eletrodo quando o somatório das forças que promovem a transferência supera o somatório das forças que tendem a retê-la (Scotti e Ponomarev, 2014). A Equação 2.6 descreve matematicamente este fenômeno.

$$F_g + F_{em} + F_a > F_\gamma + F_v \quad \text{Equação 2.6}$$

Vale ressaltar que algumas dessas forças podem ser favoráveis ou contrárias ao destacamento da gota de acordo com as condições de soldagem.

a) *Força gravitacional (F_g)*

É a força originada pela ação da gravidade, que é função da dimensão e material da gota. Pode atuar favoravelmente ou não ao destacamento da gota dependendo da posição de soldagem (Scotti e Ponomarev, 2014).

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \cos\theta \quad \text{Equação 2.7}$$

onde:

- r é o raio da gota;
- ρ é a densidade do metal líquido;
- g é a aceleração da gravidade;
- θ é o ângulo entre o eletrodo e o eixo horizontal;

b) *Força devido à tensão superficial (F_γ)*

Em uma região de interface entre dois meios diferentes, há uma camada composta por poucos átomos que apresentam uma energia superficial livre superior à energia dos átomos no interior dos volumes (Baixo, 1999). A diferença dessa energia dá origem a tensão superficial, que pode ser expressa por:

$$F_\gamma = 2\pi r \gamma \quad \text{Equação 2.8}$$

onde:

- r é o raio da gota;
- γ é a energia superficial livre;

Conforme o eletrodo se funde, o volume da gota torna-se maior. Caso não houvesse forças contrárias (como a força da gravidade), o volume da gota tenderia a crescer infinitamente, já que a tensão superficial tende a retê-la na ponta do eletrodo.

Porém, à medida que a tensão superficial aumenta em proporção direta com o raio da gota, a força da gravidade (na posição plana) aumenta em proporção do raio ao cubo. Ou seja, haverá um raio crítico em que a gota se destaca (Kim e Eagar, 1993; Scotti e Ponomarev, 2014). Segundo Ogino e Hirata (2015) a tensão superficial é a força principal atuante na retenção da gota na ponta do arame-eletrodo e é independente da corrente de soldagem pois é determinada de acordo com o formato da gota.

Mas também há casos cuja tensão superficial favorece a transferência da gota. Quando ocorre o contato da gota com a poça de fusão (curto-circuito), a menor energia livre da superfície da poça de fusão (menor relação de área de superfície livre por volume) faz com que a gota seja sugada para dentro da poça (Scotti e Ponomarev, 2014).

c) Força de arraste (F_a)

Esta força ocorre devido ao arraste exercido pelo fluxo de gás de proteção na gota metálica. Devido a questões aerodinâmicas, depressões são geradas sob a gota (vórtices) e fazem com que esta seja sugada e arrastada pelo fluxo de proteção. Segundo Camargo et al. (2016) apesar de colaborar para o destacamento, a força de arraste é desprezível em comparação com as demais forças.

A força de arraste é expressa pela seguinte equação:

$$F_a = \frac{1}{2} \pi v^2 \rho_g r^2 C_a \quad \text{Equação 2.9}$$

onde:

- r é o raio da gota;
- v é a velocidade do gás;
- ρ_g é a densidade do gás;
- C_a é o coeficiente de arraste;

d) Força eletromagnética (F_{em})

Também conhecida como Força de Lorentz, a força eletromagnética é uma resultante radial no sentido do centro de um condutor elétrico em virtude do campo magnético gerado (regra da mão direita) pela corrente de soldagem. Este fenômeno

quando existente em um condutor sólido é desprezível, porém em um condutor líquido, no caso da gota, a força eletromagnética gerada tende a comprimi-la (Scotti e Ponomarev, 2014). Segundo Amson (1965) a Força de Lorentz à princípio impede o destacamento, em seguida assiste e, finalmente, promove o destacamento assim que se forma um “pescoço” entre a gota e o eletrodo. A força eletromagnética pode ser expressa como:

$$F_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 R^2} \left(\frac{1-r^2}{R^2} \right) \quad \text{Equação 2.10}$$

onde:

- μ permeabilidade magnética do material;
- I é a intensidade de corrente;
- R é o raio da gota;
- r é a posição no plano em que está se medindo a gota;

e) *Força de vaporização (F_v)*

Devido às elevadas temperaturas na região de acoplamento da gota com o arco, poderá ocorrer a vaporização metálica resultando em jatos de vapores metálicos que exercem uma força contrária à de destacamento da gota para a poça de fusão. Caso o acoplamento do arco fique restrito a uma pequena área sob a gota, a força poderá desviar a gota de sua trajetória normal repulsando-a e facilitando a geração de respingos (Modenesi, 2012; Scotti e Ponomarev, 2014).

$$F_v = \frac{m_0}{\rho_v} IJ \quad \text{Equação 2.11}$$

onde:

- m_0 é a massa vaporizada;
- ρ_v é a densidade do vapor;
- I é a intensidade de corrente;
- J é a densidade de corrente;

2.3.4.2 Teoria da instabilidade *pinch*

Para aplicações com a corrente inferior a corrente de transição, a teoria do equilíbrio estático das forças descreve bem as forças atuantes na transferência do metal fundido para a poça de fusão. Porém, para correntes acima da corrente de transição a transferência metálica torna-se mais dinâmica e o fenômeno da transferência das gotas pode ser explicado através da teoria da instabilidade *pinch* (Rhee e Kannatey-Asibu, 1991). Acima da corrente de transição, devido a um maior calor gerado, não há mais a formação cíclica de gotas. Ao invés disso, existe a formação de uma coluna líquida cilíndrica. A perturbação desta coluna, procedente da força radial para o centro desta (força *pinch*), ocasiona a formação de gotas sequenciais, pois estas possuem uma menor energia livre que a coluna líquida (Scotti e Ponomarev, 2014; Kim e Eagar, 1993; Simpson e Zhu, 1995).

2.4 Estabilidade do processo GMAW

A estabilidade é distintamente conceituada por diversos autores devido a sua complexidade em ser definida, já que essa pode ser avaliada por diferentes métodos. Segundo Scotti e Ponomarev (2014), estabilidade é manter o processo operando com repetitividade e uma boa aparência operacional. Esta é alcançada quando se garante, ao mesmo tempo, a estabilidade do arco elétrico e da transferência metálica. A falta de estabilidade pode levar a formação de descontinuidades, maior nível de respingos e fumos e irregularidades geométricas do cordão de solda.

Na transferência metálica por curto-circuido, três são os principais fatores para que possa ocorrer instabilidade no processo, são eles: curtos-circuitos instantâneos (o eletrodo toca rapidamente a poça de fusão sem haver transferência metálica), falha na reignição do arco (condições inadequadas momentâneas para ocorrer a reignição) e variações na velocidade de alimentação (Hermans e Den Ouden, 1999).

Há alguns anos, principalmente por causa da falta de recursos tecnológicos para quantificá-la, a estabilidade era tratada apenas de forma qualitativa. Ainda hoje, o soldador, de acordo com a sua experiência e habilidade, avalia a estabilidade através do nível de ruído e respingos gerados (Golçalves et al., 2008).

Na literatura encontram-se diversos modos de se medir a estabilidade. A maioria deles são baseados na análise de sinais gerados por um sistema de

monitoramento que realiza a medição destes. Os principais sinais analisados são as curvas de corrente e tensão, entretanto outros sinais podem ser analisados, tais como: emissão de ruídos, luminosidade do arco e imagens da região da solda obtidas por uma câmera de alta velocidade (Suban e Tušek, 2003).

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

2.4.1 Indicadores de estabilidade

Através da análise dos oscilogramas, podem ser extraídos dois índices básicos: tempo de arco aberto (t_{ab}) e tempo de curto-circuito (t_{cc}), que representam o tempo de crescimento da gota fundida na ponta do eletrodo e a duração da transferência dessa gota para a poça de fusão, respectivamente. Através destes, índices auxiliares podem ser derivados para ajudar na análise da estabilidade do processo (Scotti e Ponomarev, 2014).

Baixo e Dutra (1995), em seu trabalho sobre a influência da indutância na regularidade na soldagem GMAW por curto-circuito, utilizaram-se dos desvios padrão de picos de corrente, período de transferência e de curto-circuito como indicativos de estabilidade. O desvio padrão de pico de corrente apresentou uma sensibilidade maior para irregularidades na transferência, o que pode gerar problemas de repetibilidade desse indicativo. O mesmo pode apresentar variações da ordem de 50% em situações de transferências realizadas sob os mesmos parâmetros e com depósitos de características aparentemente iguais.

Avaliando a influência de pequenas variações no arame na estabilidade do processo, Modenesi e Avelar (1999) obtiveram em seus resultados uma indicação de que a estabilidade elétrica do processo e a quantidade respingo gerada possuem um comportamento similar em relação a tensão de soldagem. Assim, em uma tentativa de representá-los simultaneamente, definiram um Índice de Estabilidade (IE) do processo conforme a Equação 2.12.

$$IE = \frac{100}{T \cdot R}$$

Equação 2.12

onde:

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

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

Suban e Tušek (2003) utilizaram além de índices de estabilidade baseados em análises estatísticas, conforme com Dutra (1989), um índice baseado em ciclogramas, que são gráficos com aspecto de laços que mostram os valores instantâneos de tensão em função da corrente. Segundo os autores, os ciclogramas apresentam de maneira simples e rápida (podendo ser em tempo real) a estabilidade do processo.

Roca et al. (2005) também se basearam nos ciclogramas para apresentarem um índice de estabilidade. Propôs-se um algoritmo para o cálculo da área dos laços do gráfico e concluiu-se que essa se tratava de uma ferramenta precisa para avaliar a estabilidade.

Meneses et al. (2014) no estudo da estabilidade (geração de respingo) da transferência metálica na geração de fumos, concluíram que não há uma correlação entre esses, ou seja, uma transferência mais estável não significa menos fumos gerados, apesar dessa condição reduzir a quantidade de respingos.

Cayo e Alfaro (2012) avaliaram a estabilidade do processo GMAW através do monitoramento da continuidade das emissões acústicas do arco por um sistema de lógica *fuzzy*. Roca et al. (2007) também utilizaram um índice com base nas emissões acústicas, porém baseados no desvio padrão entre os tempos de curto-circuito e desvio padrão das amplitudes dos picos dos sinais acústicos.

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

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

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

Considera-se como postulado que a melhor condição de soldagem GMAW por curto-circuito é aquela que oferece uma maior estabilidade na transferência, que deve ser controlada pela tensão superficial sem que, necessariamente, haja um maior rendimento de deposição ou menor oscilação dos sinais elétricos. A partir desse postulado criou-se o “Critério Laprosolda para Quantificar a Estabilidade de Transferência por Curto-circuito no Processo de Soldagem MIG/MAG”, que se baseia nas premissas de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está relacionada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto (regularidade da transferência), e também que cada gota tenha um volume adequado ao se destacar para que haja a ação da tensão superficial na transferência metálica (Scotti e Ponomarev, 2014; Rezende et al., 2011). Sendo assim, esse critério deve satisfazer a dois parâmetros, à saber:

- 1) Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito (IV_{cc}): é utilizado para quantificar a regularidade de transferência e baseia-se no princípio que a regularidade está ligada com a constância dos tempos de curto-circuito e de arco aberto, sendo que quanto menor a variação destes, maior é a estabilidade. Utiliza-se dos desvios padrão das médias e as próprias médias desses tempos para o cálculo do IV_{cc} , conforme Equação 2.13. Quanto menor o valor deste índice,

maior é a estabilidade da transferência (Liskevych e Scotti, 2010; Souza et al., 2011; Rezende et al., 2011).

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{t_{cc}}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{t_{ab}}}{t_{ab}} \quad \text{Equação 2.13}$$

onde:

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

2) Faixa admissível de tamanho da gota em transferência por curto-circuito: define uma faixa de valores que o volume da gota em transferência deve ter para que ocorra um “sugamento” suave desta pela a poça de fusão, sendo a transferência controlada pela tensão superficial. Uma gota não deve crescer demasiadamente antes de se destacar, assim como deve possuir um volume mínimo. Porém, como medir o tamanho médio da gota é uma tarefa laboriosa e que requer equipamentos especiais, estima-se o mesmo através do cálculo da faixa admissível de frequência de curto-circuito, F_{cc} (só de curtos com transferência, removendo-se os curtos incipientes), conforme a Equação 2.14. O volume adequado de cada gota (ϕ_g) depende do material do arame-eletrodo, gás de proteção e posição de soldagem (Liskevych e Scotti, 2010; Scotti e Ponomarev, 2014; Rezende et al., 2011).

$$F_{cc} = \frac{V_{alim}(d)^2}{(\phi_g)^3} \quad \text{Equação 2.14}$$

onde:

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

2.4.2 Sistema de aquisição e análise dos sinais do arco elétrico

Observando esse contexto de necessidade de monitoramento e análise dos dados dos processos de soldagem, a IMC – Soldagem desenvolveu o sistema de aquisição de dados de soldagem SAPV4. Este sistema, que será utilizado no presente trabalho, é composto por uma maleta com sensores que podem medir os sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame, vazão do gás de proteção e softwares de aquisição dos sinais instalados em um computador (IMC Soldagem, 2014). Segundo o fabricante, o SAPV4 possui diversas funcionalidades, dentre elas tem-se:

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



Figura 2.16: Painel de conexões do SAPV4.

Fonte: IMC Soldagem (2005)

A Figura 2.17 apresenta um oscilograma de corrente gerado pelo SAPV4 na transferência por curto-circuito que resalta os picos de corrente (I_p), derivadas de subida (D_s) e derivadas de descida (D_d).

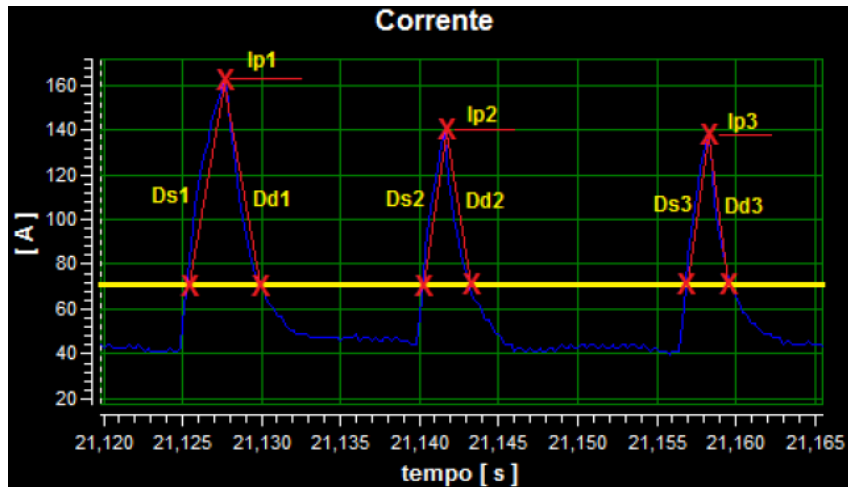


Figura 2.17: Oscilograma de corrente na transferência por curto-circuito.

Fonte: IMC Soldagem (2014)

A Figura 2.18 apresenta um oscilograma de tensão gerado pelo SAPV4 na transferência por curto-circuito que resalta os picos de tensão (U_p), períodos de transferência (T), períodos de arco aberto (T_a) e períodos de curto-circuito (T_c).

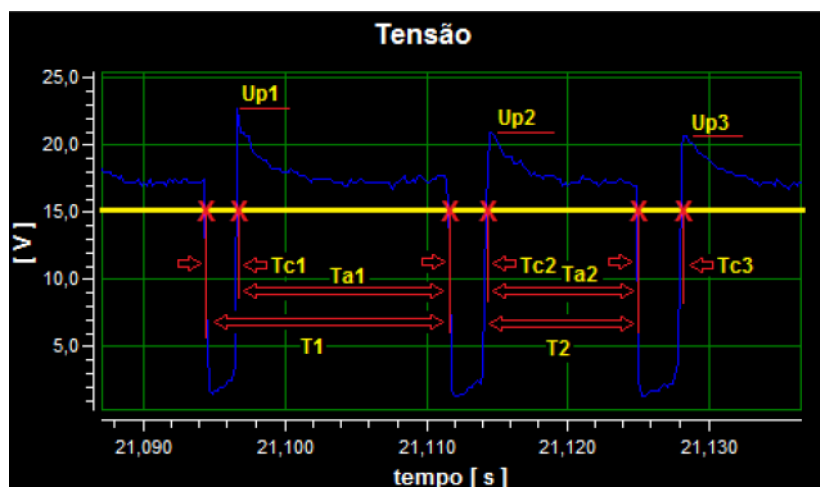


Figura 2.18: Oscilograma de tensão na transferência por curto-circuito.

Fonte: IMC Soldagem (2014)

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

- a) Média aritmética (\bar{X}): é a soma dos valores medidos de uma variável (x_i) dividida pelo número de medidas (n), conforme a Equação 2.15.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação 2.15}$$

- b) Desvio padrão (σ): é a raiz quadrada dos desvios médios quadráticos da variável em estudo em relação ao valor médio, conforme a Equação 2.16.

$$\sigma = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 / (n - 1) \right]} \quad \text{Equação 2.16}$$

- c) Coeficiente de variação (K_v): também conhecido como desvio relativo, é a razão entre o desvio padrão e a média, conforme a Equação 2.17.

$$K_v = \left(\frac{\sigma}{\bar{X}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Equação 2.17}$$

Na Figura 2.19, observa-se esses valores estatísticos considerados como indicadores de estabilidade do processo GMAW obtidos pelo sistema.



Figura 2.19: Informações gerais e dados estatísticos dos sinais adquiridos pelo SAPV4.

Fonte: IMC Soldagem (2014)

2.5 Técnicas e parâmetros operacionais

2.5.1 Principais parâmetros do processo e suas influências

Os parâmetros de soldagem são as variáveis que podem alterar a geometria do cordão, a estabilidade do arco (capacidade de manter ou reestabelecer suas características sob a ação de distúrbios), a geração de fumos e respingos, o modo de transferência metálica, entre outros, ou seja, a qualidade da solda de uma maneira geral. Existe no processo GMAW uma grande quantidade de parâmetros a serem regulados, tais como: composição e vazão do gás de proteção, diâmetro e composição do arame-eletrodo, indutância, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, corrente, comprimento do arco (ou tensão) e de extensão livre do eletrodo, entre outros. Baseando-se no processo convencional (máquina com CEF tensão constante), e após definidas as variáveis fixas, restam basicamente dois parâmetros possíveis de regulagens pelo o operador: tensão e velocidade de alimentação do arame (corrente) (Pires et al., 2006; Scotti e Ponomarev, 2014).

A Tabela 2.5 mostra alguns parâmetros de soldagem e as modificações que deve-se realizar nestas para que atinja-se determinadas características do cordão de solda.

Tabela 2.5: Ajustes dos parâmetros e influência nas características da solda.

Variáveis de soldagem para modificar	Modificações desejadas							
	Penetração		Taxa de deposição		Área da seção reta do cordão		Largura do cordão	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Corrente e vel. alim. arame	↑	↓	↑	↓	↑	↓	+	+
Tensão	+	+	*	*	*	*	↑	↓
Velocidade de soldagem	+	+	*	*	↓	↑	↓	↑
Extensão do eletrodo	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Diâmetro do arame	↓	↑	↓	↑	*	*	+	+
Gás de proteção %CO ₂	↑	↓	*	*	*	*	*	*
Ângulo da tocha	puxando a 25°	empurrando	*	*	*	*	puxando	empurrando
* sem efeito	+ pequeno efeito		↑ aumento		↓ diminuição			

Fonte: Fortes e Vaz (2005)

2.5.1.1 Corrente

Quando as demais variáveis são mantidas constante, a corrente de soldagem é regulada de acordo com a velocidade de alimentação do arame, variando de maneira não linear. A Figura 2.20 ilustra a relação entre a velocidade de alimentação do arame e a corrente de soldagem para eletrodos de aço carbono de diferentes diâmetros. Este parâmetro possui uma influência significativa sobre a taxa de deposição, modo de transferência, penetração e reforço (Bracarense, 2014; Nouri et al., 2007; Weglowski et al., 2008; Machado, 1996).

Em relação à geometria do cordão de solda, à medida que se aumenta a corrente observa-se um aumento da penetração, largura e reforço, portanto a taxa de deposição também aumenta (Modenesi, 2012; Nouri et al., 2007; Bracarense, 2014). Analisando o modo de transferência metálica existe a chamada corrente de transição,

em que o modo de transferência passa de globular para goticular (seção 2.3). Neste sentido, encontra-se na literatura esses valores para diferentes materiais e gases de proteção (Resende et al., 2009; Ferraresi et al., 2003; Heald, 1994; AWS, 2004). De acordo com os resultados obtidos por Weglowski et al. (2008), utilizando Ar como gás de proteção à medida que a corrente de soldagem aumenta, o diâmetro da gota transferida diminui e a frequência de destacamento das gotas aumenta.

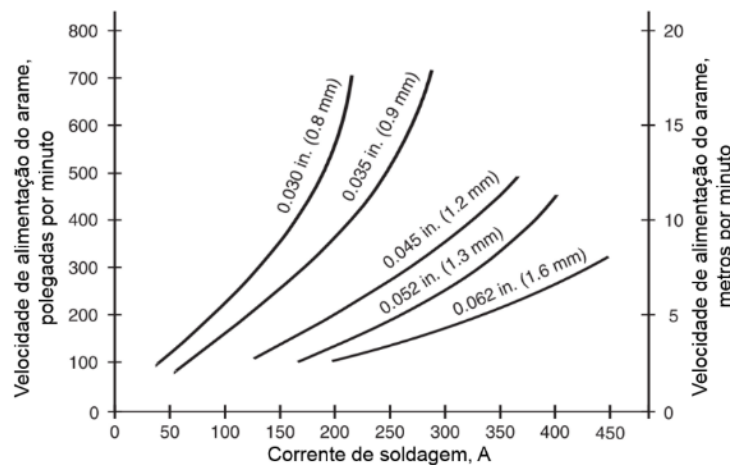


Figura 2.20: Velocidade de alimentação do arame *versus* corrente de soldagem.

Fonte: Adaptado de Nadzam et al. (2011)

2.5.1.2 Tensão

Mantendo-se os demais parâmetros do processo constante, a tensão do arco é proporcional ao comprimento do arco. Ainda que a variável de interesse seja o comprimento do arco, a tensão é a variável mais fácil de ser monitorada, associando-a como um parâmetro que governa o processo (Bracarense, 2014). Com o aumento da tensão de soldagem, observa-se uma modificação na geometria do cordão de solda, tornando-o mais largo e mais baixo (menor reforço) (Modenesi, 2012).

Segundo Rezende et al. (2011) e Modenesi (2012), conforme a tensão de soldagem aumenta, a estabilidade do processo tende a melhorar. No entanto, após atingir um ponto de máxima estabilidade, esta tende a se deteriorar. De acordo com Machado (1996) uma tensão muito baixa tende a causar estreitamento do cordão, porosidade, e um cordão mais convexo. Em contrapartida, uma tensão excessivamente alta tende a gerar excesso de respingo e porosidade. A estabilidade do arco é prejudicada em ambos os casos.

Durante a operação da soldagem, o comprimento do arco elétrico pode se auto ajustar em virtude da alteração da distância da tocha à peça de trabalho (dentro de um certo limite) por um motivo qualquer. Este fenômeno é um exemplo da inter-relação entre as variáveis de soldagem. Cada arco elétrico tem uma relação característica entre a tensão requerida, para uma condição específica de soldagem, em função da corrente (CEA – Característica Estática do Arco). Definindo-se as variáveis de soldagem, localiza-se na Figura 2.21 um ponto de trabalho (1) de acordo com o encontro entre a CEA (a_1) e a CEF (U_1).

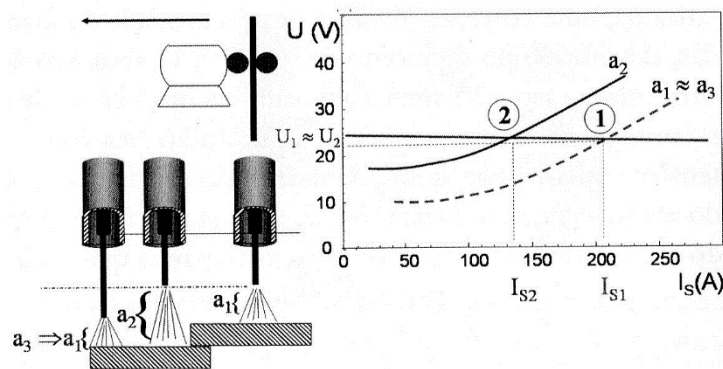


Figura 2.21: Ilustração do fenômeno de auto ajuste do comprimento do arco do processo GMAW.

Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

Ao aumentar a distância entre a tocha e a peça, o arco elétrico tende, a princípio, a crescer. Utilizando uma fonte com CEF de tensão constante, não ocorre uma variação significativa da tensão, obrigando a corrente a diminuir (CEA a_2 e ponto 2), conseqüentemente menor será velocidade de fusão do arame-eletrodo. Como a velocidade de alimentação do arame permanece a mesma, ela se torna maior que a velocidade de fusão. Sendo assim, o arame-eletrodo tende a se aproximar da peça, reduzindo gradativamente o comprimento do arco. Esta redução gera o aumento progressivo da corrente de soldagem, e dessa forma, ambos tendem a retornar aos seus valores originais (a_3). Na realidade, devido ao maior comprimento de extensão livre do eletrodo haverá um maior aquecimento por efeito Joule do mesmo, ou seja, a corrente tende a ficar um pouco abaixo do valor original para manter a taxa de fusão constante (Scotti e Ponomarev, 2014).

2.5.2 Projeto da solda

O projeto da solda é uma tarefa que exige o conhecimento de inúmeras questões nas diversas áreas da engenharia. Este inicia-se através do reconhecimento de uma necessidade, que pode ser a construção de um novo produto ou a melhoria em um produto já existente através de técnicas mais avançadas (Lincoln, 2000).

Caso o objetivo seja a fabricação de um novo produto, informações sobre produtos similares já existentes devem ser coletadas. Se o projeto for uma melhora de um modelo mais antigo, os pontos fortes e fracos do projeto existente devem ser considerados. Além dessa análise dos projetos existentes, necessita-se determinar as condições de carga as quais a solda estará submetida, a preparação da peça de trabalho, a geometria e composição química das peças e da solda, o tipo de junta, subconjuntos e suas montagens, procedimento de soldagem, controle de deformação, limpeza e inspeção. (AWS, 2001; Lincoln, 2000).

Para obter-se um conjunto desejado de características para o cordão de solda, é necessário um ajuste rigoroso dos parâmetros de soldagem devido a sensibilidade que o processo GMAW apresenta à variação destes. Há uma certa dificuldade na determinação desses valores, pois, além de serem muitos, apresentam forte relação entre si e influenciam na qualidade do cordão (Marques et al., 2006).

A escolha inadequada dos parâmetros e materiais na realização da solda em estruturas metálicas, vasos de pressão, pontes, oleodutos, componentes automotivos, gasodutos, navios, entre outros, pode gerar acidentes com perdas materiais, ambientais e humanas. Para minimizar a probabilidade dessas ocorrências, as operações de soldagem para diversas aplicações são regidas por códigos e especificações que cobrem as mais diferentes etapas, desde a qualificação do operador e de procedimento até os processos de inspeção e avaliação de descontinuidades (Modenesi, 2005).

Na indústria, quando exige-se um controle das operações de soldagem utiliza-se a Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) que contém dados do metal base e consumíveis, características da junta e parâmetros de soldagem à serem utilizados pelo soldador, o que varia de acordo com o processo de soldagem utilizado e da norma aplicada. É necessária a qualificação da EPS em corpo de prova (CP) adequado e de acordo com o requerimento da norma, projeto ou contrato o procedimento é aprovado ou não (Modenesi, 2005).

2.5.2.1 Juntas

As cargas aplicadas em uma estrutura soldada, são distribuídas de uma parte para a outra através do cordão de solda depositado sob as juntas, ambos especificados pelo projeto. Na Figura 2.22 observa-se os principais tipos de junta utilizadas. Entretanto, especificar apenas a junta não é o suficiente, pois, como podemos observar na Figura 2.23 para a junta de topo, por exemplo, existem diversos tipos de chanfros possíveis que são aplicáveis.

Para a solda em filete não é necessário a preparação de chanfro na junta, reduzindo então os custos envolvidos no procedimento de soldagem. Dessa forma, a solda em filete torna-se a escolha preferencial sempre que o projeto permitir, sendo aplicadas em juntas sobreposta, “T” e de canto. Quando é necessária uma solda em filete com 16 mm ou mais, uma solda com chanfro deve ser considerada, seja sozinha ou em conjunto com a solda em filete (AWS, 2001).

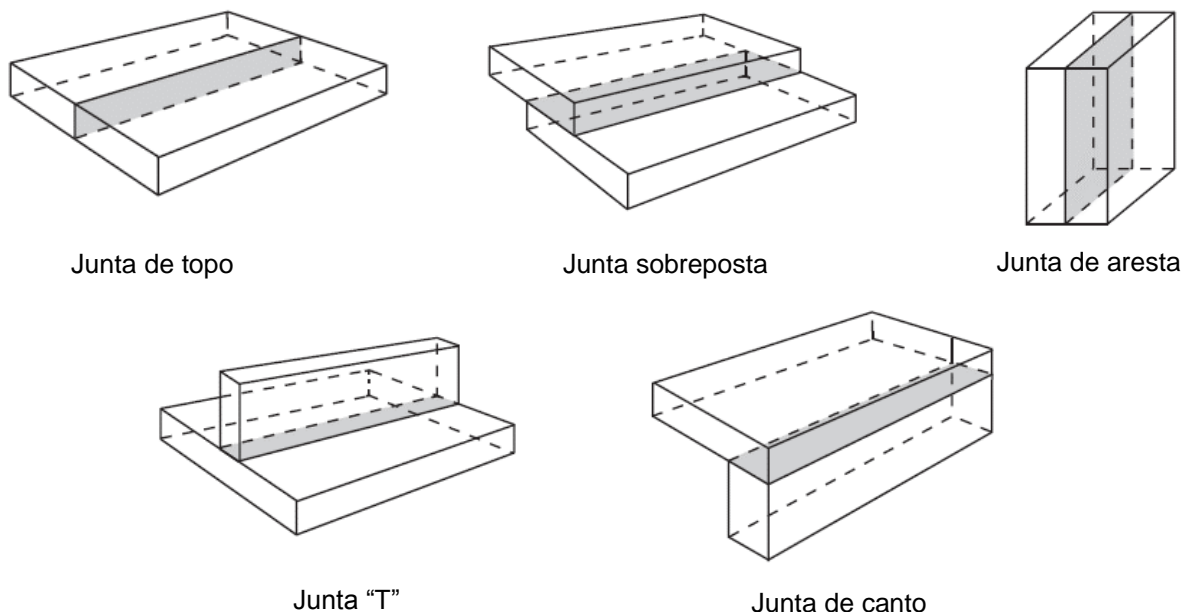


Figura 2.22: Principais tipos de juntas utilizadas em soldagem.

Fonte: Adaptado de AWS (2001)

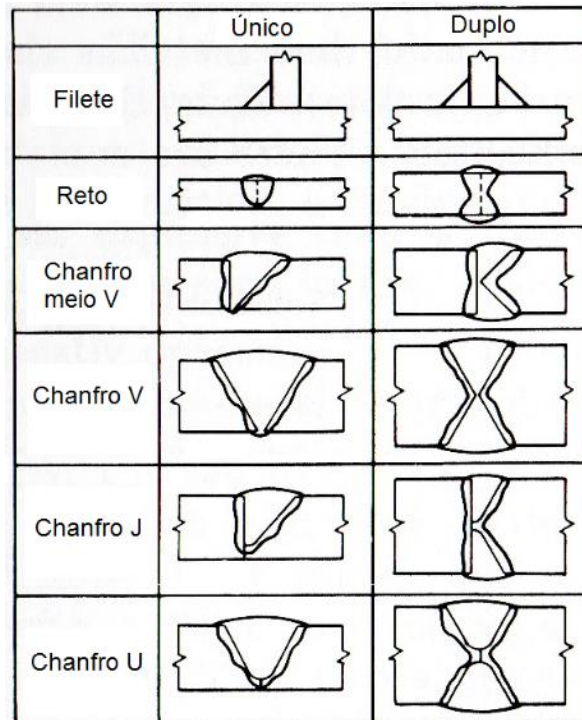


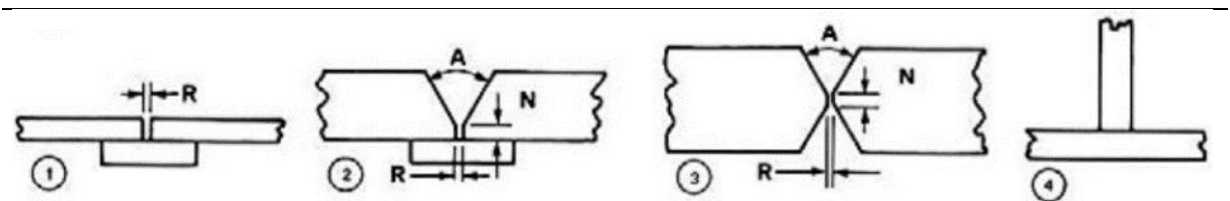
Figura 2.23: Chanfros de soldagem.

Fonte: Adaptado de Lincoln (2000)

2.5.2.2 Condições de soldagem

Os valores únicos fornecidos no procedimento de soldagem, tais como corrente, tensão e velocidade de soldagem, são um indicativo de um ponto ótimo ou inicial de trabalho, mas não são o único bom roteiro a ser seguido para a execução das soldas. Espera-se que o operador molde esses valores de acordo com a sua aplicação de forma a ampliá-lo obtendo uma faixa de valores sensata. Quando realiza-se o ajuste das condições ótimas de soldagem em função das particularidades da aplicação, é aconselhável realizar testes para a qualificação. Esses valores quando presentes na EPS devem ser expressos já em uma faixa aceitável e não valores únicos (Lincoln, 2000; Fortes e Vaz, 2005). Na Tabela 2.6 observa-se alguns parâmetros de soldagem típicos de acordo com o projeto da junta a ser soldada para o gás Ar+25%CO₂.

Tabela 2.6: Condições de soldagem em aço carbono com transferência por curto-circuito e arame ER70S-3.



Esp. chapa (mm)	Posição de soldagem	Projeto de Junta	Abertura de Raiz (R)	Nariz (N)	Arame Ø	Vel. de alimentação do arame (mm/seg)	Tensão	Corrente	Vel. de soldagem (mm/seg)
0,64	P,H,V,S	1 & 4	0		0,76	47-51	13-14	45-50	8-11
0,94	P,H,V,S	1 & 4	0		0,76	53-57	13-14	55-60	8-11
	P,H,V,S	1 & 4	0		0,89	47-51	15-16	70-75	13-15
	P	1	0,79		0,89	76-80	16-17	110-115	11-13
	H	1	0,79		0,89	72-76	16-17	105-110	11-13
1,6		4			0,89	76-80	16-17	110-115	10-12
	V,S	1	0,79		0,89	59-63	15-16	85-90	5-8
		4			0,89	61-66	15-16	90-95	10-12
	P	1	0,79		0,89	112-116	18-20	150-155	6-8
		1	0,79		1,1	63-68	18-19	160-165	6-8
	H	1	0,79		0,89	93-97	17-18	130-135	5-8
3,2		4			0,89	114-118	18-20	155-160	10-12
		4			1,1	74-78	18-20	175-185	11-13
	V,S	1	0,79		0,89	93-97	17-18	130-135	5-8
		4			0,89	93-97	17-19	130-135	8-10
	P	1	4,8		1,1	93-97	19-20	210-215	3-10
		2	2,4	1,6	1,1	93-97	19-20	210-215	5-10
	H	4			1,1	89-95	19-21	210-215	6-8
4,8		1	4,8		1,1	76-80	18-20	175-185	5-7
		2	2,4	1,6	1,1	76-80	18-20	175-185	6-8
	V,S	2	2,4	1,6	0,89	85-89	17-18	120-125	4-6
		4			0,89	102-106	17-19	140-145	5-8
	P	2	2,4	1,6	1,1	99-104	20-21	220-225	5-7
	H	2	2,4	1,6	1,1	76-80	18-20	175-185	3-5
6,4		4			1,1	99-104	20-21	220-225	3-5
	V,S	2	2,4	1,6	0,89	85-89	17-18	120-125	2-3
		4			0,89	102-106	18-19	140-145	5-7
	V	4			0,89	93-97	17-19	130-135	2-3
	H	2	2,4	1,6	1,1	76-80	18-20	175-185	5-7
		4			1,1	99-104	20-21	220-225	3-5

Fonte: Fortes e Vaz (2005)

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

a) Soldagem

Para a execução dos experimentos, utilizou-se como metal base 48 chapas de aço carbono SAE 1020 com 200 mm de comprimento, sendo 32 delas com 6,35 mm de espessura e 50 mm de largura, e as outras 16 com 12,7 mm de espessura e 152 mm de largura. A serra Franho S/ 500 e a serra fita horizontal S-3720 da Starret foram utilizadas para realizar o corte refrigerado das chapas, que foram limpas com a esmerilhadeira angular Makita 9557 equipada com flap disco. A Tabela 3.1 apresenta a composição química do metal base, sendo os valores únicos o percentual máximo do elemento.

Tabela 3.1: Composição química requerida para o aço SAE 1020.

Classificação SAE	Porcentagem em Peso			
	C	Mn	P	S
1020	0,18	0,30		
	a	a	0,030	0,050
	0,23	0,60		

Fonte: SAE (2001)

O metal de adição utilizado foi o ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, conforme classificação AWS A5.18 (2005). Este arame-eletrodo possui a maior combinação de silício e manganês (elementos desoxidantes), permitindo a soldagem com o gás de proteção CO₂ puro com uma faixa de corrente elevada (Lincoln, 2000; AWS, 2005). A Tabela 3.2 apresenta a composição química do eletrodo que foi utilizado neste trabalho, sendo os valores únicos o percentual máximo do elemento.

Tabela 3.2: Composição química requerida para o eletrodo ER70S-6.

Classificação AWS	Porcentagem em Peso									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-6	0,06	1,40	0,80							
	a	a	a	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50
	0,15	1,85	1,15							

Fonte: AWS (2005)

Os gases de proteção convencionais utilizados foram os gases mais usuais no processo GMAW em aço carbono, cada um com seu respectivo percentual de H₂ adicionado e fornecidos em cilindros pela empresa White Martins, são eles: CO₂ puro, CO₂+3%H₂, Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+1,5%H₂.

A fonte de soldagem utilizada foi um conjunto semiautomático para soldagem GMAW do fabricante ESAB modelo Smashweld 316 com CEF tensão constante e alimentador de arame embutido.

Foi utilizado um trator de soldagem modelo A2T Multitrac da ESAB, que garante uma velocidade de soldagem constante e evita variações indesejadas no ângulo da tocha e na distância do bico de contato à peça (DBCP), que são oscilações normalmente geradas pelo soldador na soldagem manual.

Durante a soldagem, os respingos foram coletados por meio de um coletor de respingos fabricado em chapa de aço carbono com 2 mm de espessura, e o sistema SAPV4 da IMC – Soldagem (mostrado na Figura 3.1 e detalhado no item 2.4.2) realizou a aquisição para posterior tratamento dos dados de soldagem. A Tabela 3.3 apresenta as faixas de medições desse sistema.



Figura 3.1: Sistema de aquisição de dados portátil SAPV4.

Fonte: IMC Soldagem (2014)

Tabela 3.3: Faixas de medição do sistema de aquisição de dados SAPV4.

Variável	Faixa	Resolução	+/- Erro
Corrente	-600 a 600 A	0,8 A	2%
Tensão	-100,0 a 100,0 V	0,1 V	1%
Velocidade de alimentação do arame	0 a 25,0 m/min	0,1 m/min	2%
Taxa de amostragem dos sinais instantâneos	5000	Hz	0,1 %

Fonte: IMC Soldagem (2014)

b) Inspeção

Para detectar pequenas descontinuidades superficiais no cordão de solda, foi utilizado o líquido penetrante visível e lavável em água VP-30 e o revelador não aquoso D-70, ambos do fabricante *Metal-Check*.

A microestrutura da amostra foi analisada qualitativamente por meio do microscópio Olympus QX41. Para a preparação metalográfica da amostra utilizou-se o aparelho de corte Arocor 80 da Arotec, a lixadeira semiautomática Struers-Panambra DP-10, lixas de granulometria (em mesh) de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200, a politriz automática Aropol 2V da Arotec, pastas abrasivas de alumina de granulometria igual a 1 μm , 0,3 μm e 0,05 μm e solução de Nital 2% (2% em volume de ácido nítrico em solução com álcool etílico).

A medição de dureza Vickers das amostras previamente preparadas foi efetuada através do microdurômetro HMV-2 da Shimadzu.

3.2 Metodologia

A avaliação da estabilidade do processo de soldagem GMAW com a adição de hidrogênio nas misturas convencionais será executada em três etapas.

3.2.1 Primeira etapa

O objetivo desta etapa é definir duas velocidades de alimentação de arame com suas respectivas tensões, que forneçam a transferência metálica por curto-circuito mais estável dentro das faixas operacionais preestabelecidas, para cada um dos gases de proteção. Estes parâmetros mais estáveis serão utilizados na segunda etapa.

3.2.1.1 Preparação e soldagem das chapas

O aço carbono SAE 1020, utilizado ao longo da primeira etapa, estava disponibilizado em varas de 6 m de comprimento, 6,35 mm de espessura e 50 mm de largura. Para seccioná-lo em chapas com o comprimento desejado de 200 mm, foi utilizada a serra Franho. Após o corte das chapas, removeu-se as rebarbas e as

camadas de óxidos, gorduras, graxas, óleos, poeira, entre outros contaminante que por ventura estavam presentes. Para tal, foi utilizado o escovamento mecânico com esmerilhadeira angular equipada com flap disco, expondo dessa forma a superfície do metal.

Foram depositados cordões de solda sobre as chapas para os seguintes gases de proteção: Ar+25%CO₂, Ar+25%CO₂+1,5%H₂, CO₂ puro e CO₂+3%H₂. A Tabela 3.4 mostra os parâmetros de soldagem que foram mantidos constantes ao longo do trabalho.

Tabela 3.4: Parâmetros utilizados para soldagem das chapas.

Parâmetros	
Chapas de Teste	aço SAE 1020
Arame	ER70S-6, Ø= 1,2 mm
Soldagem	mecanizada
Distância do bico de contato a peça (DBCP)	12 mm
Vazão do gás de proteção	15 l/min
Velocidade de soldagem	30 cm/min
Regulagem da Indutância	fixa
Posição de Soldagem	plana

Como a corrente de soldagem possui forte influência sobre a transferência metálica e a geometria do cordão de solda, optou-se em mantê-la dentro de uma faixa de valores. Para isso, testes preliminares foram executados para determinar a velocidade de alimentação do arame em função do gás de proteção correspondente à faixa de corrente desejada. Depois, foi buscada uma relação entre as velocidades de alimentação encontradas e a velocidade de soldagem que permitisse obter cordões de solda com geometria adequada (avaliada pelo aspecto visual).

Foram utilizadas duas faixas de corrente, uma entre 130 e 150 A, que corresponde a um valor próximo ao limite inferior da faixa de corrente utilizada para o arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm, e uma outra faixa de 190 a 210 A, que corresponde a uma faixa de corrente mais usual.

A justificativa para aplicar valores baixos de corrente é que em condições críticas quaisquer pequenas mudanças nas regulagens dos parâmetros (no caso, adição de H₂ no gás de proteção) podem influenciar fortemente no comportamento do processo de soldagem. Enquanto que em condições mais favoráveis a estabilidade do processo é menos sensível. Dessa forma, foi almejado maximizar o efeito, ou seja,

tornar mais visível a influência da adição de H₂ no gás de proteção convencional em relação a estabilidade do processo de soldagem.

Para as duas velocidades de alimentação de arame obtidas para cada gás, com o objetivo de obter desde arcos muito curtos a muito longos, a tensão regulada na fonte foi sistematicamente alterada entre 15 e 21 V para a faixa de corrente mais baixa e entre 16 e 22 V para a faixa de corrente mais elevada. A razão para variar as tensões é dada pelo fato do comprimento do arco elétrico influenciar a regularidade da transferência metálica e que cada gás de proteção pode obter valores diferentes de tensão para um mesmo comprimento de arco.

3.2.1.2 Análise qualitativa dos cordões de solda

Ao longo dos experimentos, as soldas foram avaliadas qualitativamente quanto a produção de respingos, escória e ruído. Após a realização dos cordões de solda, estes foram inspecionados visualmente em relação a aparência.

3.2.1.3 Avaliação da estabilidade do arco elétrico

Durante a soldagem, o sistema SAPV4 que estava acoplado ao conjunto de solda coletou os sinais elétricos (tensão e corrente), a velocidade de alimentação do arame e a vazão de gás para cada cordão de solda, com frequência de aquisição de 5000 Hz. Os dados foram analisados no intervalo de 10,00 a 35,00 segundos, devido a possibilidade de uma grande variação no início e no final do arco elétrico. Através da leitura instantânea dos valores de tensão e corrente, foram obtidos os índices de estabilidade utilizados no presente trabalho, são eles:

- Desvio padrão dos picos de corrente (DPPC);
- Desvio padrão dos períodos de arco aberto (DPAA);
- Desvio padrão dos períodos de curto-circuito (DPCC);
- Índice de Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc);

Cada gás de proteção teve dois valores de alimentação de arame (duas faixas de corrente propostas) com sua respectiva tensão que forneceu a transferência metálica mais estável, avaliada por meio dos índices de estabilidade acima.

3.2.2 Segunda etapa

O objetivo desta etapa é avaliar e comparar a estabilidade do processo GMAW nos corpos de prova soldados com atmosferas de proteção convencionais com suas respectivas misturas contendo H_2 . Para tal, foram utilizados os parâmetros definidos como mais estáveis na primeira etapa.

As soldas foram executadas com os mesmos materiais e equipamentos da etapa anterior, porém em corpos de prova previamente preparados ao invés de cordões sobre a chapa. Para verificar a estabilidade dos sinais elétricos foram utilizados os mesmos índices da etapa anterior (DPPC, DPAA, DPCC e IVcc). Entretanto, para a avaliação da estabilidade do processo como um todo foram acrescentados:

- Ensaio visual e por líquido penetrante;
- Avaliação da quantidade de respingos gerados;
- Taxa de deposição;
- Avaliação da geometria do cordão de solda;

3.2.2.1 Preparação e soldagem dos corpos de prova

Nesta etapa, foi pretendido simular aplicações práticas da soldagem GMAW por meio da execução de soldas em juntas de topo com chanfro “V” na posição plana e soldas de filete em juntas “T” na posição horizontal, pois em aplicações reais cordões de solda não são depositados sobre a chapa.

O corte e limpeza do metal base foi executado conforme descrito na primeira etapa para as chapas utilizadas na junta “T”. Entretanto, as chapas utilizadas na fabricação do CP com chanfro “V”, além do corte na serra Franho, também foram cortadas na serra fita, sendo o corte realizado no centro da chapa e com ângulo de corte de 30° , dessa forma ao se unir duas chapas uma junta com ângulo de 60° foi formada. As dimensões (em mm) e as geometrias dos corpos de prova são mostradas na Figura 3.2.

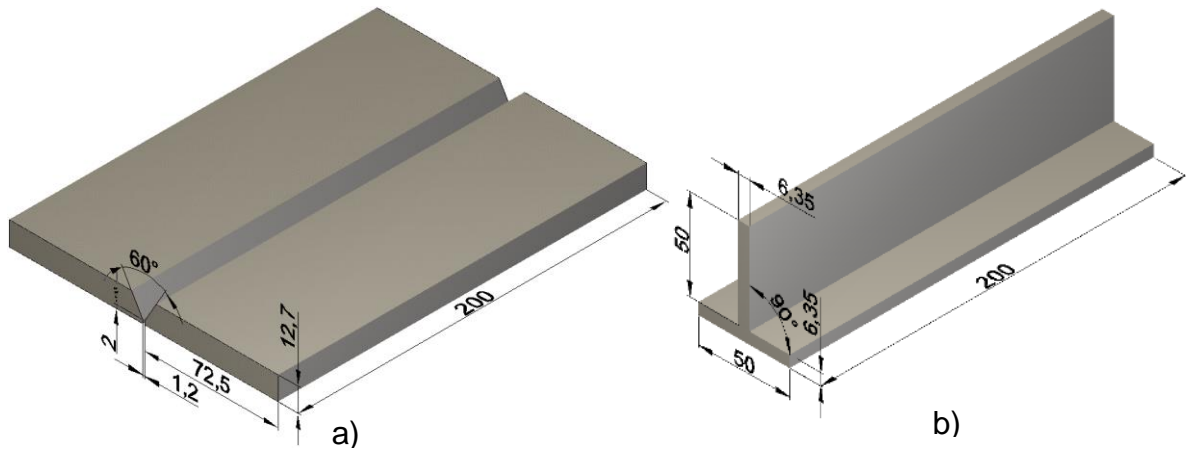


Figura 3.2: Dimensões e geometrias das juntas: a) de topo com chanfro “V”; b) de ângulo em “T”.

A soldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com os parâmetros mantidos fixos indicados na Tabela 3.4, exceto a posição de soldagem da junta “T” (horizontal). Para cada um dos gases de proteção ($\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$, CO_2 puro e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$) foram realizadas soldas para os dois valores de velocidade de alimentação de arame e sua respectiva tensão que obteve a melhor estabilidade do processo, conforme definido pela primeira etapa. Cada um desses parâmetros foi utilizado para a soldagem de duas juntas de cada tipo, sendo realizado apenas um cordão por junta. Sendo assim, para cada gás de proteção, utilizou-se 4 chapas com espessura de 12,7 e largura de 152 mm (a mesma foi cortada ao meio para gerar um CP com chanfro “V”), e mais 8 chapas com espessura de 6,35 e largura de 50 mm para as juntas “T”, conforme exemplificado pela Tabela 3.5 para o CO_2 .

Tabela 3.5: Quantidade de chapas necessárias para execução do procedimento com o CO_2 .

Gás	Parâmetros	Junta	Nº juntas	Nº chapas	Total de chapas
CO_2	$V_{\text{alim 1}}$; U 1	“T”	2	4	12
		“V”	2	2	
	$V_{\text{alim 2}}$; U 2	“T”	2	4	
		“V”	2	2	

Para fixar as duas chapas que compunham o corpo de prova, mantendo assim 90° entre elas para a junta “T” e 1,2 mm de espaçamento para a junta “V”, e evitar que ocorresse movimento relativo entre elas durante a soldagem, foi realizado o

ponteamento (cordões de solda curtos) nas extremidades da junta “V” e do lado oposto ao da soldagem na junta “T”.

3.2.2.2 Fabricação do coletor de respingos

Para tornar possível a avaliação da quantidade de respingos gerados, fabricou-se um coletor de respingos. O mesmo foi confeccionado em chapa de aço carbono com 2 mm de espessura, limpa por meio de esmerilhadeira angular equipada com flap disco. Foi necessário dimensioná-lo de forma que o mesmo se adaptasse ao espaço físico disponível (sem atrapalhar o deslocamento do trator e da tocha) e aos dois diferentes tipos de CP (junta “T” e junta “V”). O item 4.2.2 discute a respeito da fabricação do coletor.

3.2.2.3 Avaliação da quantidade de respingos gerados

Após a soldagem dos oito corpos de prova de cada gás, os respingos aderidos na tocha, nos corpos de prova e no coletor de respingos foram coletados e pesados para ser calculada a quantidade de respingos gerada. Optou-se em acumular os respingos coletados, de acordo com o gás utilizado, para gerar uma maior quantidade destes e facilitar a pesagem que ocorreu em uma balança eletrônica de precisão, com resolução de 0,001 g. A relação entre a quantidade de respingos gerada (Q_{res}) e a soma dos tempos de soldagem dos oito corpos de prova de cada gás (ΣTS) gera a taxa de respingo (T_{res}) destes, conforme a Equação 3.1.

$$T_{res} \left(\frac{g}{min} \right) = \frac{Q_{res}}{\Sigma TS} \quad \text{Equação 3.1}$$

3.2.2.4 Taxa de deposição

Os corpos de prova previamente preparados foram pesados antes e após a soldagem e limpeza dos mesmos. Dessa forma, foi obtida através da diferença das massas pré e pós soldagem, a massa real de material depositado no CP, ou seja, a massa do cordão de solda. Dividindo-se a massa do cordão pelo tempo de solda,

sendo este último gerado através do SAPV4 em ms, obtém-se a taxa de deposição. As unidades foram convertidas para se obter a taxa de deposição em kg/h.

$$\text{Taxa de deposição } \left(\frac{kg}{h}\right) = \frac{\text{massa do cordão de solda}}{\text{tempo soldando a peça}} \quad \text{Equação 3.2}$$

3.2.2.5 Análise qualitativa dos cordões de solda

Após a realização dos cordões de solda, os mesmos foram inspecionados visualmente conforme o procedimento PR-050 (ABENDI, 2011), com o objetivo de detectar descontinuidades superficiais grosseiras e avaliar de forma geral a aparência do cordão, e por líquido penetrante conforme procedimento PR-001 (ABENDI, 2015), para a detecção de pequenas descontinuidades superficiais. Para a realização desses ensaios não destrutivos foi realizada a limpeza do cordão de solda e em aproximadamente 25 mm nas regiões adjacentes por escovamento. Realizou-se o registro fotográfico de cada peça antes e após a inspeção.

3.2.2.6 Avaliação da geometria do cordão de solda

Para realizar a avaliação geométrica foi necessário a preparação metalógrafa de uma amostra obtida pelo corte da seção transversal do cordão de solda. Em seguida, foi realizado o lixamento, utilizando-se as lixas com as seguintes granulometrias (em mesh): inicialmente a de 100, sendo o lixamento na direção perpendicular aos rios de corte até o completo desaparecimento destes, e sequencialmente, as lixas de 220, 320, 400 e 600, mantendo sempre o lixamento na direção perpendicular aos riscos deixados pela lixa anterior. Por último, foi realizado o ataque químico da amostra com Nital 2%.

A geometria do cordão de solda foi medida através do programa de processamento de imagens ImageJ, conforme Figura 3.3 e Figura 3.4. O tamanho da solda de filete é medido através do tamanho das pernas do maior triângulo reto que pode ser inscrito na seção transversal da solda (Lincoln, 2000).

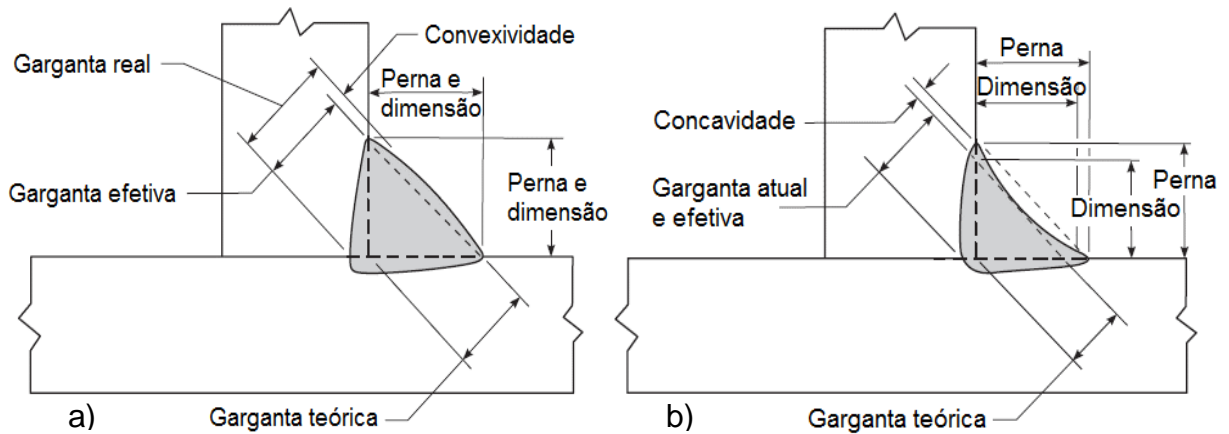


Figura 3.3: Dimensões da solda de filete em junta "T": a) solda convexa; b) solda côncava.

Fonte: Adaptado de AWS (2001)

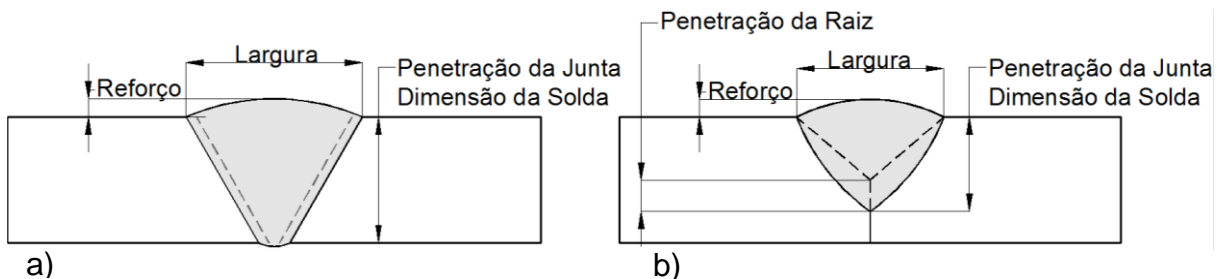


Figura 3.4: Dimensões da solda em junta V: a) penetração total da junta; b) penetração parcial da junta.

Fonte: Adaptado de PETROBRAS (2003)

3.2.3 Terceira etapa

O objetivo desta etapa é avaliar a influência da adição de H₂ nos gases de proteção convencionais no que diz respeito à microestrutura e dureza do metal de solda.

3.2.3.1 Caracterização microestrutural

Para identificar e fotografar os constituintes microestruturais presentes no metal de solda foi utilizada a microscopia ótica nas juntas "V" utilizadas no item 3.2.2.6. Para tal, a preparação metalográfica consistiu em:

- 1) Corte: a peça foi seccionada em dimensões adequadas para análise metalográfica sem danificar de forma grosseira a estrutura original do material.

- 2) Lixamento: foram utilizadas lixas de granulometrias (em mesh): 100, 220, 320, 400, 600 e 1200. Mantendo sempre o lixamento na direção perpendicular aos riscos deixados pela lixa anterior até o completo desaparecimento destes.
- 3) Polimento: realizado de forma semiautomática utilizando pasta abrasiva de alumina, sequencialmente, de granulometria igual a 1 μm , 0,3 μm e 0,05 μm , respectivamente.
- 4) Ataque químico: para que as microestruturas do metal de solda fossem reveladas através da dissolução seletiva, foi utilizada uma solução de Nital 2%.

A identificação dos constituintes da microestrutura presentes no metal de solda foi realizada utilizando-se a nomenclatura segundo as instruções de Perdigão (1987). Para tal, a microestrutura da amostra foi observada em diferentes aumentos e em diversas áreas a fim de se identificar as regiões da zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB), bem como as microestruturas presentes na zona fundida. A Tabela 3.6 apresenta a nomenclatura dos constituintes principais que podem ser encontrados no metal de solda de aços ferríticos.

Tabela 3.6: Microestruturas principais do metal de solda.

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

Fonte: adaptado de Perdigão (1987)

3.2.3.2 Dureza Vickers

As amostras utilizadas para avaliação da microestrutura do metal de solda também foram utilizadas para a avaliação da dureza Vickers. A medição do valor de dureza tem como objetivo verificar, juntamente com a caracterização microestrutural, se a zona fundida apresentou variações significativas com a adição de H_2 no gás de proteção.

Foi usada a escala Vickers (HV) com uma carga de 2 kg durante 10 segundos. Nesse tipo de ensaio um penetrador de diamante com formato de pirâmide de base

quadrada realiza uma carga por um determinado período de tempo sobre a região desejada, marcando-a com uma impressão quadrada. A medida dessa impressão é utilizada juntamente com a carga para o cálculo da dureza Vickers através da Equação 3.3 (Padilha, 1997). O ensaio foi realizado em 18 pontos da amostra, desde o metal base até a zona fundida, em uma linha reta localizada ao centro do cordão de solda. Durante o ensaio, foi respeitada a norma ISO 6507-1 (2018) que prescreve que a distância entre os centros das indentações e destes para as bordas dos corpos de prova deve ser de pelo menos 3 e 2,5 vezes, respectivamente, a diagonal média da impressão.

$$HV \left(\frac{Kg}{mm^2} \right) = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:

- F é carga aplicada;
- d é a diagonal da impressão regular quadrática;

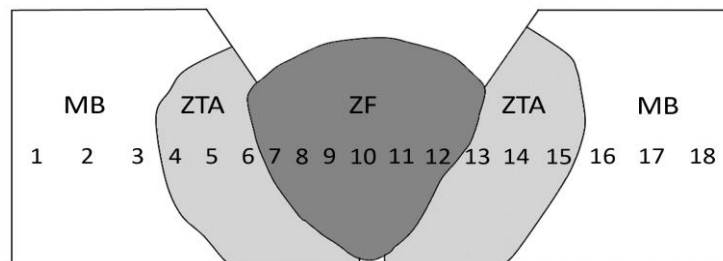


Figura 3.5: Localização dos pontos onde foram realizadas as medições de dureza Vickers.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Primeira etapa

O objetivo desta etapa foi encontrar as velocidades de alimentação de arame e as tensões que proporcionam a melhor estabilidade de soldagem para cada um dos gases: CO_2 , $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.

4.1.1 Preparação e soldagem das chapas

O metal base (aço carbono SAE 1020) foi seccionado e limpo conforme o procedimento do item 3.2.1.1. A Figura 4.1 mostra o processo de preparação das chapas antes da soldagem.

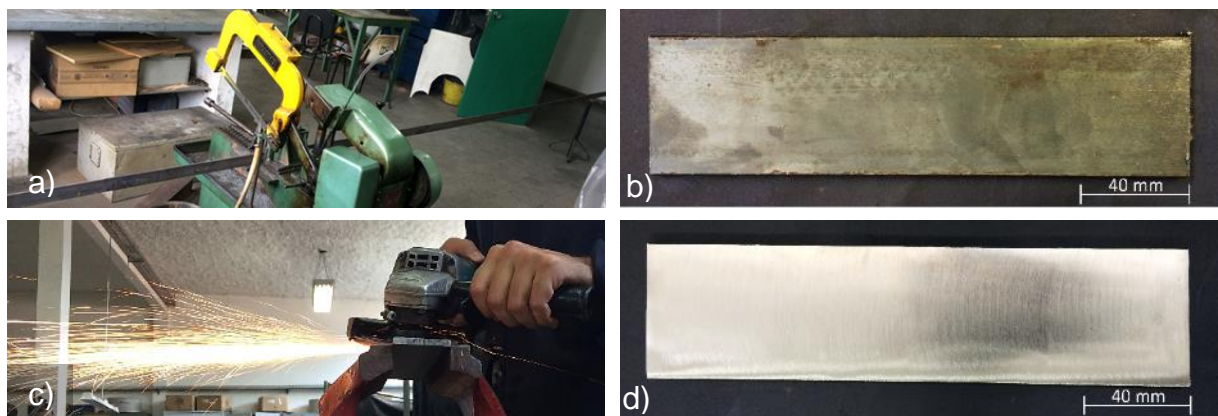


Figura 4.1: Preparação da chapa: a) corte da vara de 6 m de comprimento na serra franho; b) chapa após o corte com 200 mm de comprimento; c) remoção de rebarbas e limpeza da chapa com o flap disco; d) chapa pronta para a soldagem.

Nos testes preliminares foi identificado que as velocidades de alimentação de arame (V_{alim}) de 3,0 e 4,6 m/min forneceram os valores médios de corrente desejados de 130 a 150 A e de 190 a 210 A, respectivamente, para todos os gases. Também foi verificado que a velocidade de soldagem de 30 cm/min permitiu obter cordões de solda com geometrias adequadas em ambas as velocidades de alimentação de arame.

A Figura 4.2 apresenta os oscilogramas de tensão e corrente obtidos durante os testes preliminares com o CO_2 a uma V_{alim} de 4,7 m/min e tensão de 20 V. Foi verificado que os parâmetros de soldagem estavam adequados, pois além do ruído

característico, os oscilogramas de tensão e corrente comprovaram que as soldas estavam sendo realizadas no modo de transferência por curto-circuito.

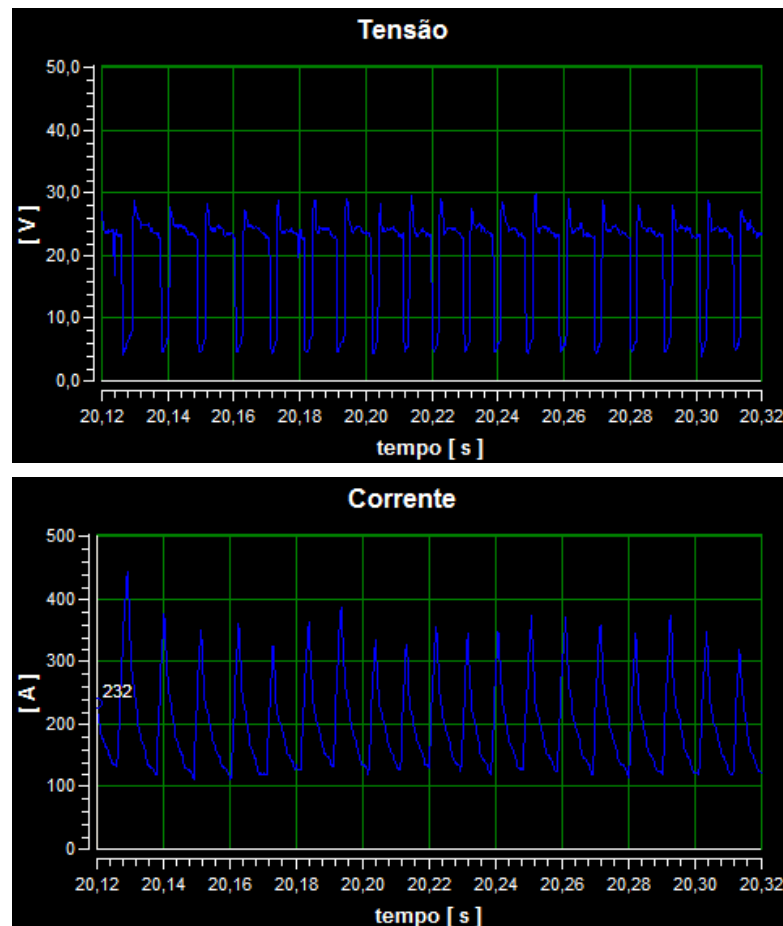


Figura 4.2: Oscilogramas de tensão e corrente obtidos nos testes preliminares.

Os cordões de solda foram executados com os gases: CO_2 , $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$. A tensão de soldagem foi modificada, de um cordão para o outro, entre 15 e 21 V para V_{alim} de 3,0 m/min, e entre 16 e 22 V para V_{alim} de 4,6 m/min. Os cordões foram depositados sobre as chapas um ao lado do outro em ambos os lados da chapa, a uma distância suficiente para que cordões adjacentes não se misturem. Como nesta etapa as soldas foram analisadas apenas qualitativamente e pelos sinais elétricos, cordões adjacentes não influenciam nos resultados um do outro, sendo assim, optou-se em soldar desta forma para melhor aproveitar as chapas.

A Figura 4.3 mostra os cordões de solda realizados com as velocidades de alimentação de 3,0 e 4,6 m/min, variando-se a tensão, respectivamente, de 15 a 21 e 16 a 22 V, para os gases CO_2 , $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.

Gás	V_{alm}	U	Foto		
CO_2	3 m/min	15			
		16			
		17			
		18			
		19			
		20			
		21			
	4,6 m/min	18			
		19			
		20			
		21			
		22			
		$\text{Ar} + 25\%\text{CO}_2$	3 m/min	15	
				16	
17					
18					
19					
20					
21					
4,6 m/min	16				
	17				
	18				
	19				
	20				
	21				
	22				

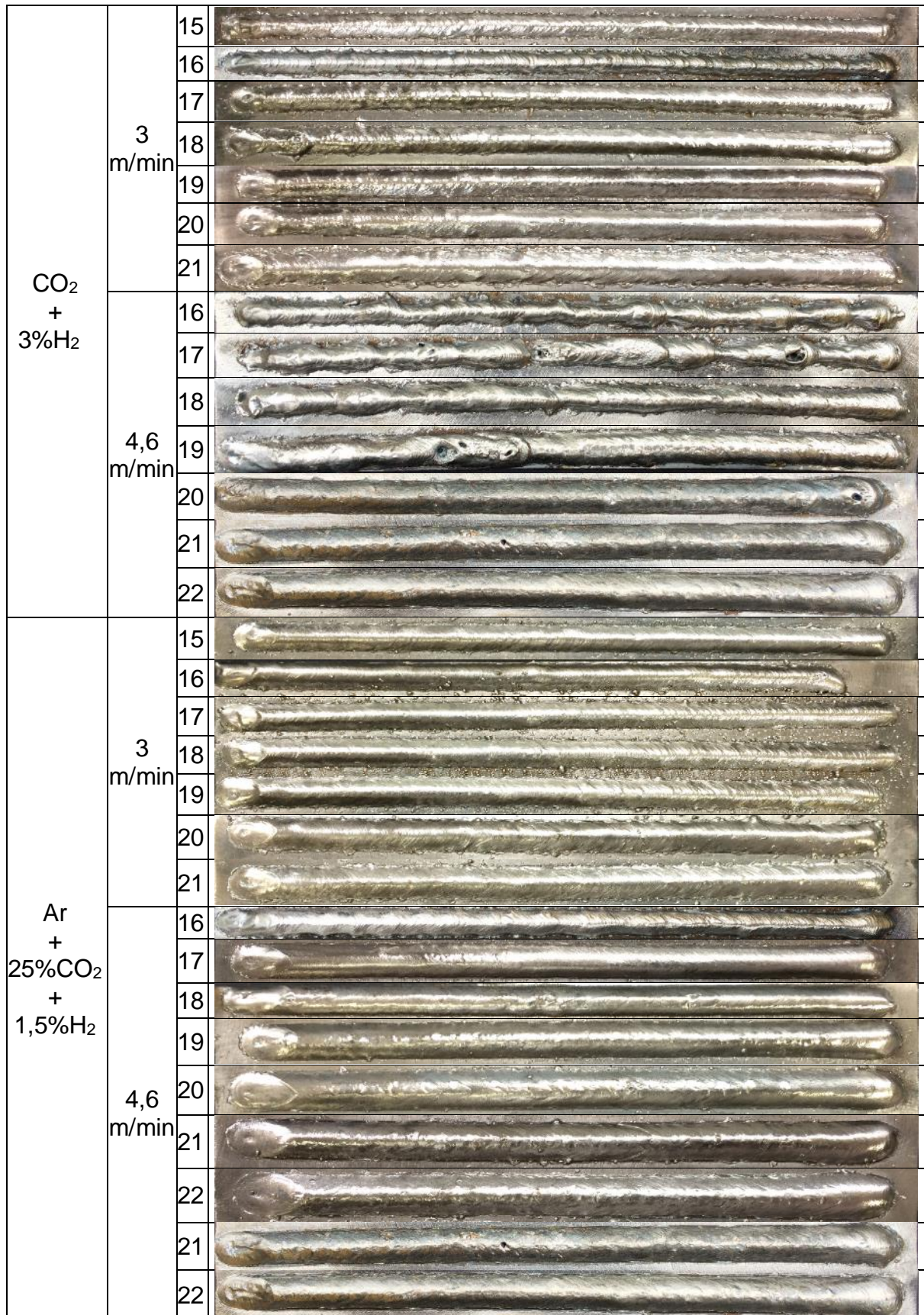


Figura 4.3: Soldas executadas com os quatro gases de proteção variando a tensão em função da V_{alim} .

4.1.2 Análise qualitativa dos cordões de solda

Avaliando a Figura 4.3, pode-se observar que à medida que se aumentava a tensão de soldagem, mantendo os demais parâmetros fixos, foi observado que o comprimento do arco elétrico aumentava e que o cordão de solda se tornava mais baixo (menor reforço) e mais largo, o que está de acordo com a literatura (Modenesi, 2012; Bracarense, 2014). Também foi identificado que, conforme a tensão aumentava, o ruído gerado pela solda ia se tornando gradativamente mais grave.

Quando a tensão era demasiadamente baixa, o cordão de solda apresentou estreitamentos em diferentes regiões, conforme os cordões executados com: Ar+25%CO₂ a uma V_{alim} de 4,6 m/min e 16 V; CO₂ a uma V_{alim} de 3 m/min e 15V; CO₂ a uma V_{alim} de 4,6 m/min e 18 V; CO₂+H₂ a uma V_{alim} de 4,6 m/min e 16, 17 e 18 V. Nestes casos, foi identificada uma dificuldade do arco elétrico em se manter aceso, era visível a olho nu que o arco elétrico se apagava momentaneamente gerando uma quantidade maior de respingos juntamente com estouros ao se reacender, como mostra a Figura 4.4. Vale a pena ressaltar que, conforme explicado no item 2.3.1, a transferência metálica por curto-circuito se caracteriza pela extinção e reignição do arco elétrico que ocorre até 200 vezes por segundo, sendo imperceptível a olho nu, diferentemente do que é mostrado na Figura 4.4, o que se considera uma instabilidade.

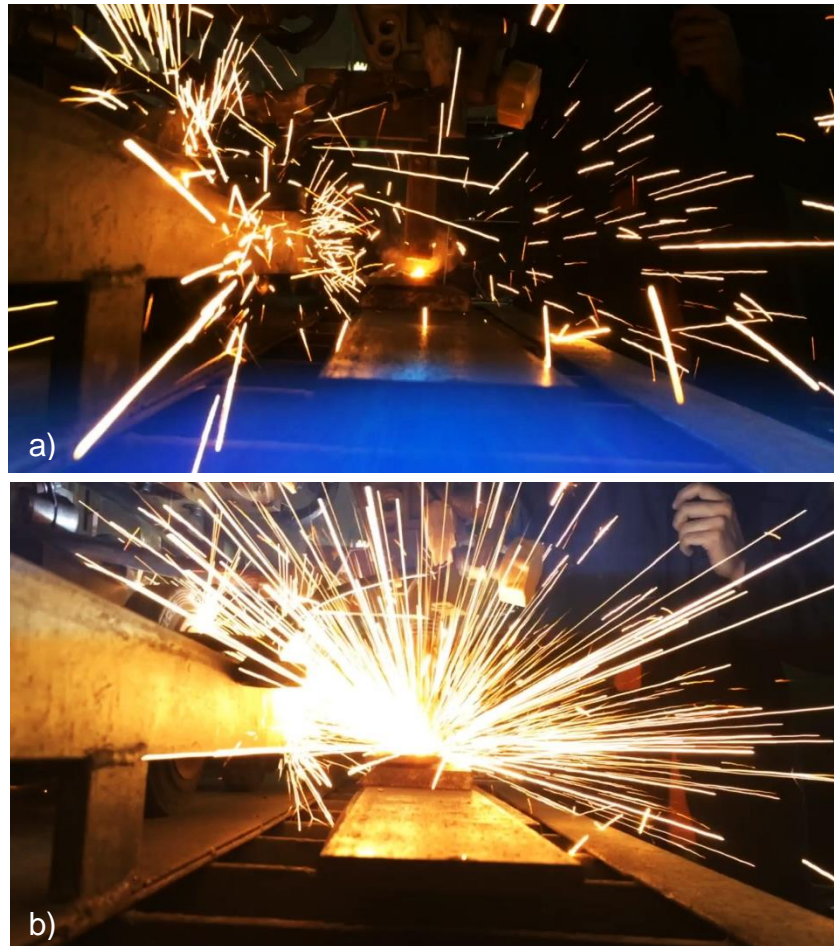


Figura 4.4: Momento de instabilidade do arco elétrico: a) extinção; b) reignição.

a) CO_2 (V_{alim} 3 m/min)

Os cordões de solda executados com 15 e 16 V estão abaixo da faixa de tensão estável para o CO_2 e uma V_{alim} de 3m/min, pois apresentaram instabilidades no ruído, na quantidade de respingos gerada e na luminosidade produzida pelo arco. As soldas executadas com as tensões entre 17 e 20 V apresentaram um bom comportamento operacional, sendo considerada a faixa de trabalho do processo. Já a tensão de 21 V está acima da faixa estável, sendo observado que os respingos gerados pareciam ser de maior tamanho e atingir locais mais distantes da região da solda. Não foram identificadas diferenças significativas quanto a geração de escória.

b) CO_2 (V_{alim} 4,6 m/min)

Não foram realizados os cordões de solda com as tensões de 16 e 17 V, pois foi observado que a tensão de 18 V já estava abaixo da faixa de estabilidade do

processo, apresentando estreitamentos no cordão, instabilidades no ruído, quantidade de respingos gerada e na luminosidade produzida. As soldas realizadas com as tensões entre 19 e 22 V apresentaram uma boa estabilidade do processo, não sendo observada diferença significativa entre elas quanto a quantidade de respingos, luminosidade e ruído, portanto esta foi considerada a faixa de tensão estável para a soldagem com o CO₂ e uma V_{alim} de 4,6 m/min. Entretanto, na solda executada com a tensão de 22 verificou-se uma largura demasiada do cordão de solda e maior quantidade de escória, principalmente na lateral do cordão.

c) Ar+25%CO₂ (3,0 m/min)

Os cordões de solda realizados com tensão entre 15 e 18 V apresentaram boa regularidade do processo, não sendo perceptível diferença significativa entre eles, portanto esta foi considerada a faixa de estabilidade para a soldagem com o Ar+25%CO₂ a uma V_{alim} de 3,0 m/min. Foi observada apenas a diferença característica na geometria do cordão (mais largo e mais baixo) com o aumento da tensão. Apesar disso, todos foram considerados cordões de boa aparência. Já as tensões de 19, 20 e 21 V produziram soldas com cordões considerados largos demais, com o arco elétrico apresentando instabilidades quanto ao ruído, luminosidade e quantidade de respingos gerados, que aparentemente eram de maior tamanho, ou seja, essas tensões estão acima da faixa estável para o processo. As soldas apresentaram uma pequena quantidade de escória, não sendo identificadas diferenças relevantes quanto a produção desta.

d) Ar+25%CO₂ (4,6 m/min)

A tensão de 16 V apresentou extrema instabilidade, sendo esta tensão considerada demasiadamente baixa para a soldagem com o Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 4,6 m/min. Por este motivo, o cordão de solda foi interrompido antes do fim da chapa, o que justifica o menor comprimento do cordão exibido na Figura 4.3. As tensões de 17 e 18 V apresentaram sob o ponto de vista qualitativo, o melhor desempenho operacional. As tensões de 19, 20 e 21 V também produziram soldas consideradas estáveis, porém foi possível identificar algumas variações no ruído, na luminosidade e na quantidade de respingos gerados. Sendo assim, as tensões entre 17 e 21 V foram

consideradas a faixa de trabalho do processo. Já a tensão de 22 V está acima da faixa de estabilidade, pois foi considerada instável por apresentar grandes variações no ruído, luminosidade e respingos gerados. As soldas apresentaram uma pequena quantidade de escória, não sendo identificadas diferenças relevantes quanto a produção desta.

e) $CO_2+3\%H_2$ (3,0 m/min)

Com exceção das soldas realizadas com 15 e 16 V, onde se observou uma instabilidade na luminosidade gerada pelo arco elétrico, na quantidade de respingos e no ruído gerado, as demais tensões (17 a 21 V) foram consideradas estáveis, não sendo identificada nenhuma alteração significativa na estabilidade das soldas. As tensões de 15, 16 e 17 V produziram soldas com irregularidades na sua geometria, sendo consideradas excessivamente altas e estreitas. Por este motivo, as tensões de 15 a 17 V foram consideradas abaixo da faixa de estabilidade do processo, que está compreendida entre as tensões de 18 e 21 V. As soldas apresentaram uma pequena quantidade de escória, não sendo identificadas diferenças relevantes quanto a produção desta.

f) $CO_2+3\%H_2$ (4,6 m/min)

As tensões de 16 a 18 V estão abaixo da faixa de estabilidade do processo para a soldagem com o $CO_2+3\%H_2$ e V_{alim} de 4,6 m/min, pois não apresentaram um bom desempenho operacional. Além do estreitamento do cordão de solda, também é possível identificar a presença de poros na tensão de 17 V. Já as tensões de 19 a 22 V compreendem a faixa de trabalho mais estável do processo, pois apresentaram boa estabilidade do arco elétrico, com geometria do cordão adequada e sendo constante a luminosidade, ruído e respingos gerados. Entretanto, detectou-se a presença de poros em regiões específicas desses cordões. Não foram identificadas diferenças significativas quanto a geração de escória.

g) $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ (3,0 m/min)

Os cordões de solda realizados com as tensões entre 15 e 21 V com atmosfera de proteção de $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ e V_{alim} de 3,0 m/min apresentaram um bom

comportamento operacional. Não foram identificadas alterações significativas quanto a estabilidade do arco elétrico, sendo toda a faixa de tensão testada, de 15 a 21 V, considerada a faixa de trabalho do processo. Todos os cordões de solda apresentaram geometrias consideradas satisfatórias, apesar de se tornarem mais largo e mais baixo ao passo que a tensão era maior. As soldas apresentaram uma pequena quantidade de escória, não sendo identificadas diferenças relevantes quanto a produção desta.

h) Ar+25%CO₂+1,5%H₂ (4,6 m/min)

As soldas executadas com as tensões de 16 a 21 V foram consideradas estáveis, não sendo observada diferença expressiva entre essas quanto a quantidade de respingos, luminosidade e ruído. Foi observada apenas a alteração característica na geometria do cordão com o aumento da tensão. Já a tensão de 22 V está acima da faixa de trabalho do processo, pois apresentou instabilidades quanto ao ruído, luminosidade e quantidade de respingos gerados e o cordão de solda foi considerado largo demais. As soldas apresentaram uma pequena quantidade de escória, não sendo identificadas diferenças relevantes quanto a produção desta.

A tabela Tabela 4.1 apresenta as faixas de tensões estáveis, conforme análise qualitativa, para os gases CO₂, Ar+25%CO₂, CO₂+3%H₂ e Ar+25%CO₂+1,5%H₂ com V_{alim} de 3,0 e 4,6 m/min.

Tabela 4.1: Faixa de tensão mais estável para cada gás de acordo com a análise qualitativa.

Gás	U (V)	
	V _{alim} 3,0 m/min	V _{alim} 4,6 m/min
CO ₂	17-20	19-22
Ar+25%CO ₂	15-18	17-21
CO ₂ +3%H ₂	18-21	19-22
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	15-21	16-21

Analisando a Tabela 4.4 pode-se observar que quando se aumenta o teor de CO₂ do gás de proteção ou a V_{alim} utilizada, a faixa de estabilidade do processo foi deslocada para valores maiores de tensão, o que está de acordo com Liskevych e Scotti (2015). A adição de 1,5% de H₂ no Ar+25%CO₂ tende a ampliar a faixa de estabilidade do processo, ou seja, o gás contendo H₂ produz uma solda estável em um intervalo de tensões maior que o respectivo gás comercial. Já no CO₂, a adição

de 3% de H₂ na soldagem com V_{alim} de 3,0 m/min deslocou a faixa de estabilidade para maiores valores de tensão, entretanto para a V_{alim} de 4,6 m/min não foram identificadas alterações. Quando a tensão utilizada estava abaixo ou acima desta faixa, foi observado um mal comportamento operacional da solda. A análise quantitativa da estabilidade (item 4.1.3) permitirá melhor definir as faixas e a alteração nas mesmas em função dos gases de proteção e V_{alim} utilizada.

4.1.3 Avaliação da estabilidade do arco elétrico

A Tabela 4.2 apresenta os seguintes dados das soldas realizadas na primeira etapa: gás utilizado, velocidade de alimentação (V_{alim}), tensão regulada na fonte de soldagem (U), corrente média registrada no SAP (I_m), valor médio dos picos de corrente (I_p), desvio padrão dos picos de corrente (DPPC), média do tempo de arco aberto (t_{ab}), desvio padrão dos períodos de arco aberto (DPAA), média do tempo de curto-circuito (t_{cc}), desvio padrão dos períodos de curto-circuito (DPCC) e o Índice de Vilarinho de Regularidade da Transferência em curto-circuito (IVcc).

Tabela 4.2: Dados regulados e obtidos nas soldas da primeira etapa para os diferentes gases de proteção.

Gás	V _{alim} (m/min)	U (V)	I _m (A)	I _p (A)	DPPC (A)	t _{ab} (ms)	DPAA (ms)	t _{cc} (ms)	DPCC (ms)	IVcc
CO ₂	3,0	15	146,4	282,8	62,2	6,1	3,0	3,5	1,9	1,03
		16	146,0	268,6	59,5	5,9	2,6	3,1	1,8	1,02
		17	140,0	256,1	39,0	5,5	2,1	2,0	0,7	0,73
		18	140,9	254,4	37,8	5,4	1,9	1,9	0,7	0,72
		19	144,5	254,1	37,5	5,2	1,8	1,9	0,7	0,71
		20	141,6	273,9	46,8	7,4	3,6	1,7	0,7	0,90
	4,6	21	140,1	291,6	58,5	9,2	5,0	1,8	0,8	0,99
		18	199,1	370,3	79,0	7,6	10,9	4,9	4,4	2,33
		19	197,7	367,2	65,0	7,5	2,1	3,0	1,3	0,71
		20	197,5	358,3	60,2	7,4	2,3	2,4	1,0	0,73
		21	198,6	370,3	66,7	7,9	2,4	2,7	1,3	0,79
		22	188,0	359,0	66,6	9,2	4,3	2,0	1,0	0,97
Ar + 25%CO ₂	3,0	15	145,5	284,0	32,7	8,4	4,8	2,6	0,8	0,88
		16	149,2	274,8	36,2	7,4	3,7	2,5	0,7	0,78
		17	144,4	292,5	37,8	10,1	5,8	2,3	0,7	0,88
		18	145,8	313,1	52,3	12,5	7,3	2,4	0,9	0,96
		19	146,5	331,1	64,3	15,7	9,6	2,5	1,0	1,01
		20	143,2	357,4	72,1	23,4	13,4	2,6	1,1	1,00
	4,6	21	140,5	351,0	64,6	23,9	13,6	2,6	1,1	0,99
		16	194,9	335,3	67,7	6,8	14,1	3,0	3,5	3,24
		17	196,7	328,5	30,1	6,8	0,8	2,9	0,7	0,36
		18	198,3	327,7	35,7	7,2	2,1	2,2	0,7	0,61
		19	197,5	337,0	49,3	8,2	3,6	2,1	0,9	0,87
		20	201,4	330,7	68,0	7,2	4,0	1,6	1,1	1,24
CO ₂ + 3%H ₂	3,0	21	200,2	327,6	71,7	8,0	4,7	1,6	1,0	1,21
		22	193,9	337,0	107,5	13,0	10,6	1,5	1,2	1,62
		15	141,4	285,6	61,0	6,5	3,2	3,5	1,9	1,04
		16	145,8	290,6	63,4	6,4	2,8	3,2	1,5	0,91
		17	142,5	286,0	58,9	6,6	2,9	2,8	1,3	0,90
		18	141,3	284,7	51,0	6,6	2,7	2,5	1,0	0,81
	4,6	19	135,9	275,5	43,8	6,8	3,1	2,1	0,7	0,79
		20	137,6	280,6	44,6	7,5	3,3	2,0	0,6	0,74
		21	138,6	286,9	46,5	8,0	3,4	1,9	0,7	0,79
		16	191,6	393,2	82,8	11,4	15,0	7,5	8,2	2,41
		17	199,1	379,6	71,5	7,6	7,3	5,1	4,6	1,86
		18	192,0	374,0	73,8	8,5	8,4	4,5	4,3	1,94
Ar + 25%CO ₂ + 1,5%H ₂	3,0	19	196,1	389,6	57,8	7,8	3,2	4,0	1,8	0,86
		20	193,8	383,1	57,5	8,2	2,4	3,3	1,2	0,66
		21	193,6	385,6	64,4	8,3	2,5	3,3	1,3	0,70
		22	189,8	379,1	66,3	9,4	3,9	2,6	1,1	0,84
		15	140,5	274,4	33,5	7,8	4,1	2,5	0,6	0,77
		16	139,6	271,2	26,9	8,3	4,3	2,3	0,4	0,69
	4,6	17	139,2	285,0	39,4	9,1	5,6	2,4	0,7	0,91
		18	136,4	293,2	47,4	11,1	6,8	2,4	0,8	0,95
		19	134,8	309,9	48,3	14,4	9,0	2,4	0,8	0,96
		20	134,3	331,5	45,1	19,6	10,6	2,3	0,7	0,85
		21	140,2	352,5	72,2	19,8	12,2	2,6	1,2	1,08
		16	204,7	350,9	46,4	7,4	2,4	3,6	1,3	0,69
4,6	17	197,7	330,3	29,7	6,7	0,9	2,6	0,5	0,33	
	18	203,7	352,2	30,1	7,5	1,5	2,5	0,6	0,44	
	19	206,4	352,9	49,6	7,2	2,4	2,3	0,8	0,68	
	20	204,2	358,3	60,1	8,3	3,4	2,0	1,0	0,91	
	21	200,9	358,2	61,1	8,7	4,1	2,0	1,0	0,97	
	22	198,2	356,2	93,3	10,5	6,6	1,7	1,2	1,33	

Foi confirmada, quantitativamente, a presença de faixas de tensões estáveis para todos os gases e que estas são alteradas em função do gás de proteção e V_{alim} utilizados na soldagem das chapas. O DPPC, DPAA, DPCC e IVcc apresentaram um comportamento semelhante à medida que as tensões eram alteradas, facilitando assim a definição das faixas operacionais do processo.

Para efeito da segunda etapa, os desvios padrões e o Índice de Vilarinho foram utilizados para definir uma única tensão que forneceu a melhor estabilidade de soldagem de acordo com o gás e a V_{alim} utilizados, apesar de terem sido identificadas faixas de tensão com bom comportamento operacional. Sendo assim, destaca-se na Tabela 4.2 os dados da tensão considerada mais estável. Ressalta-se que quanto menor o valor dos índices, melhor é a estabilidade do arco elétrico.

a) CO_2 (V_{alim} 3 m/min)

Com base nos dados da Tabela 4.2, gerou-se o gráfico da Figura 4.5 que mostra a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada para as soldas realizadas com CO_2 e V_{alim} de 3,0 m/min.

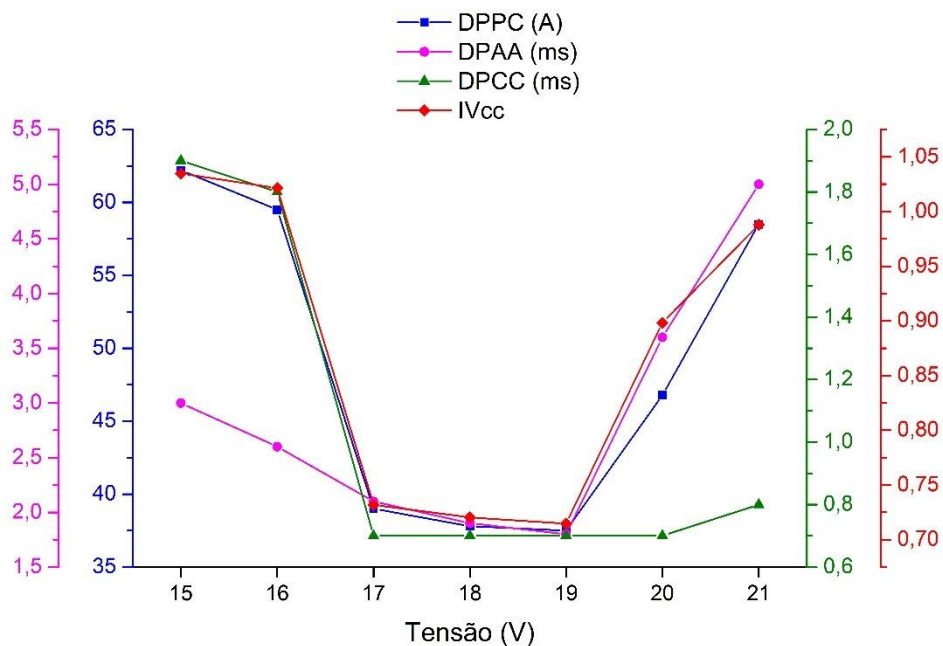


Figura 4.5: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão para o CO_2 com V_{alim} de 3,0 m/min.

Foi observado que as tensões de 15 e 16 V apresentam valores elevados em seus índices, sendo consideradas abaixo da faixa com bom desempenho operacional.

Os índices possuem uma queda acentuada em seus valores na tensão de 17 V, se estendendo até a tensão de 19 V para o DPPC, DPAA e IVcc e até a tensão de 20 V para o DPCC, com posterior aumento dos valores. Ou seja, o DPCC apresenta uma faixa de melhor estabilidade entre as tensões de 17 e 20 V e nos índices DPPC, DPAA e IVcc esta faixa está entre 17 e 19 V. Todos os índices apresentaram um valor mínimo (máxima estabilidade) na tensão de 19 V. Dessa forma, a tensão de 19 V foi escolhida para realizar as soldas da segunda etapa com CO₂ e V_{alim} de 3 m/min.

b) CO₂ (V_{alim} 4,6 m/min)

Com base nos dados da Tabela 4.2, gerou-se o gráfico da Figura 4.6 que mostra a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada para as soldas realizadas com CO₂ e V_{alim} de 4,6 m/min.

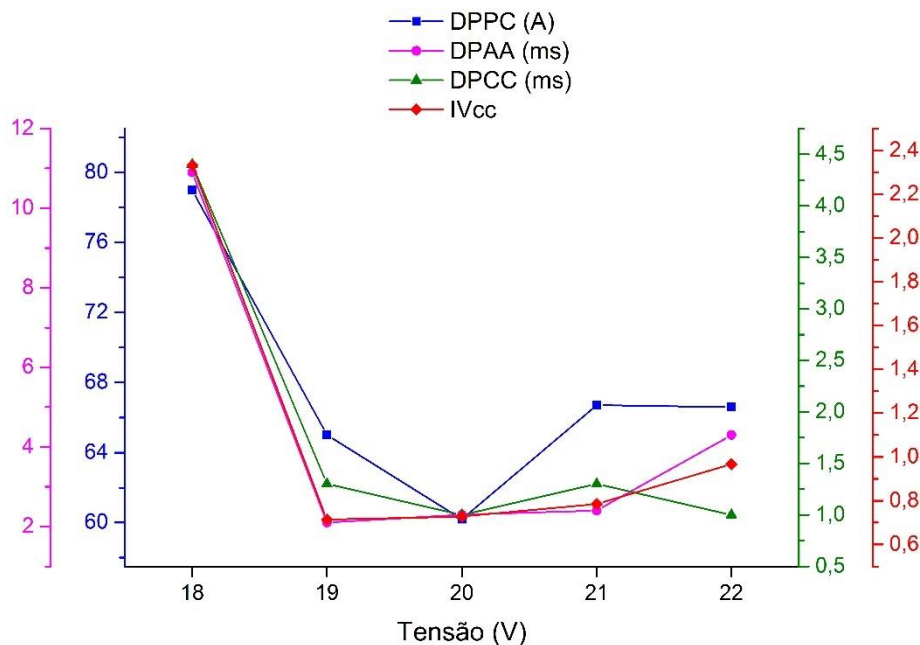


Figura 4.6: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão para o CO₂ com V_{alim} de 4,6 m/min.

Através da análise quantitativa, foi verificado que a decisão de não soldar com as tensões de 16 e 17 V foi correta, pois a tensão de 18 V já estava abaixo da faixa com bom comportamento operacional e apresentou todos os índices com valores bem acima das demais tensões testadas, confirmando a instabilidade observada na análise qualitativa.

Foi observada uma brusca redução nos valores dos índices quando se aumenta a tensão de 18 para 19 V, sendo este o início da faixa de estabilidade do arco elétrico que se estende até 22 V. Mas, como para a segunda etapa apenas um valor de tensão deve ser selecionado, os índices foram avaliados pontualmente. Na tensão de 19 V ocorre os menores valores de DPAA e IVcc. Entretanto, o DPPC e o DPCC apresentam valores mínimos em 20 V. Dessa forma, dois índices apresentaram a melhor estabilidade em 19 V e os outros dois em 20 V. Contudo, na tensão de 20 V foi detectada uma maior congruência dos índices. Portanto, para realizar as soldas da segunda etapa com CO₂ e V_{alim} de 4,6 m/min, optou-se em utilizar a tensão de 20 V.

c) Ar+25%CO₂ (V_{alim} 3,0 m/min)

Com base nos dados da Tabela 4.2, gerou-se o gráfico da Figura 4.7 que mostra a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada para as soldas realizadas com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 3,0 m/min.

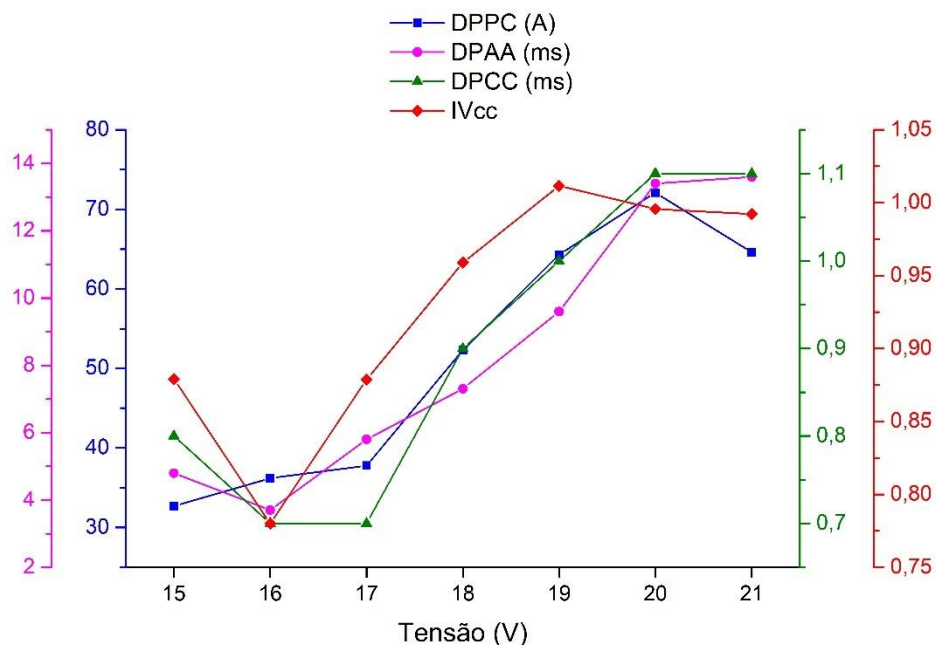


Figura 4.7: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão para o Ar+25%CO₂ com V_{alim} de 3,0 m/min.

Foi verificado que existe uma faixa com bom comportamento operacional na soldagem com o Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 3,0 m/min entre 15 e 17 V. Já a partir de 18 V

a tensão está acima desta faixa, apresentando valores elevados em seus índices. Com exceção do DPCC que apresenta um valor mínimo em 15 V, ocorre uma variação similar nos índices DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada. Estes possuem um ponto de mínima em 16 V (o DPCC apresenta o mesmo valor para a tensão de 17 V) com um posterior aumento dos valores. Sendo assim a tensão de 16 V foi adotada para realizar as soldas da segunda etapa com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 3 m/min.

d) Ar+25%CO₂ (V_{alim} 4,6 m/min)

Com base nos dados da Tabela 4.2, gerou-se o gráfico da Figura 4.8 que mostra a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada para as soldas realizadas com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 4,6 m/min.

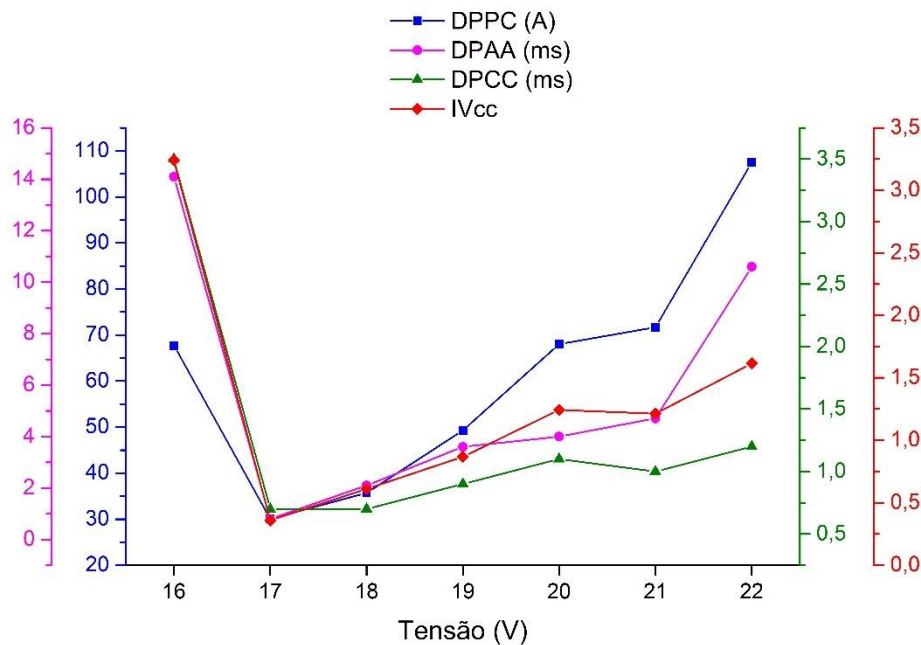


Figura 4.8: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão para o Ar+25%CO₂ com V_{alim} de 4,6 m/min.

Foi constatado que todos os índices apresentaram um comportamento semelhante à medida que a tensão de soldagem era alterada. Na tensão de 16 V, todos apresentaram valores elevados (baixa estabilidade), ocorrendo uma redução severa destes quando se aumentou a tensão para 17 V, sendo este o ponto de mínima

(mais estável) para os quatro índices de estabilidade e onde se inicia a faixa de trabalho estável do processo. A partir de então, ao passo que se eleva a tensão, os valores vão gradativamente se elevando (perdendo a estabilidade do arco elétrico). Ainda assim, pode ser considerada a existência de uma faixa de estabilidade entre 17 e 19 V. Para realizar as soldas na segunda etapa com Ar+25%CO₂ e V_{alim} de 4,6 m/min, escolheu-se a tensão de 17 V.

e) CO₂+3%H₂ (V_{alim} 3,0 m/min)

Com base nos dados da Tabela 4.2, gerou-se o gráfico da Figura 4.9 que mostra a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada para as soldas realizadas com CO₂+3%H₂ e V_{alim} de 3,0 m/min.

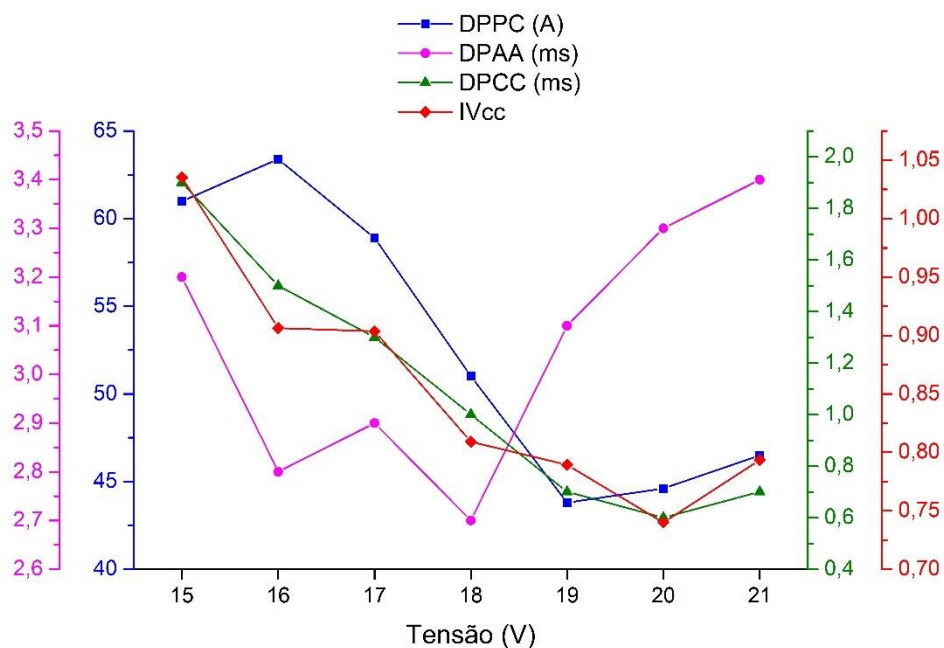


Figura 4.9: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão para o CO₂+3%H₂ com V_{alim} de 3,0 m/min.

Foi identificado que as tensões entre 15 e 18 V estão abaixo da faixa com bom comportamento operacional, que está compreendida entre as tensões de 19 e 21 V. O IVcc e o DPCC apresentam uma tendência em reduzir os seus valores à medida que a tensão aumenta, atingindo um ponto de mínima em 20 V e subindo novamente em 21 V. O DPPC apresenta um comportamento similar, entretanto o ponto de mínima ocorre em 19 V. Já o DPAA apresentou um comportamento atípico dos demais índices

analisados, exibindo um aumento em seu valor na tensão de 17 V antes de atingir o mínimo que ocorreu em 18 V, ao invés da redução gradativa até atingir a máxima estabilidade. Como o DPPC apresentou boa estabilidade em 19 e 20 V e o DPCC e o IVcc o ponto de mínima em 20 V, foi decidido realizar as soldas da segunda etapa com $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ e V_{alim} de 3,0 m/min com a tensão de 20 V.

f) $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ (V_{alim} 4,6 m/min)

Com base nos dados da Tabela 4.2, gerou-se o gráfico da Figura 4.10 que mostra a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada para as soldas realizadas com $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ e V_{alim} de 4,6 m/min.

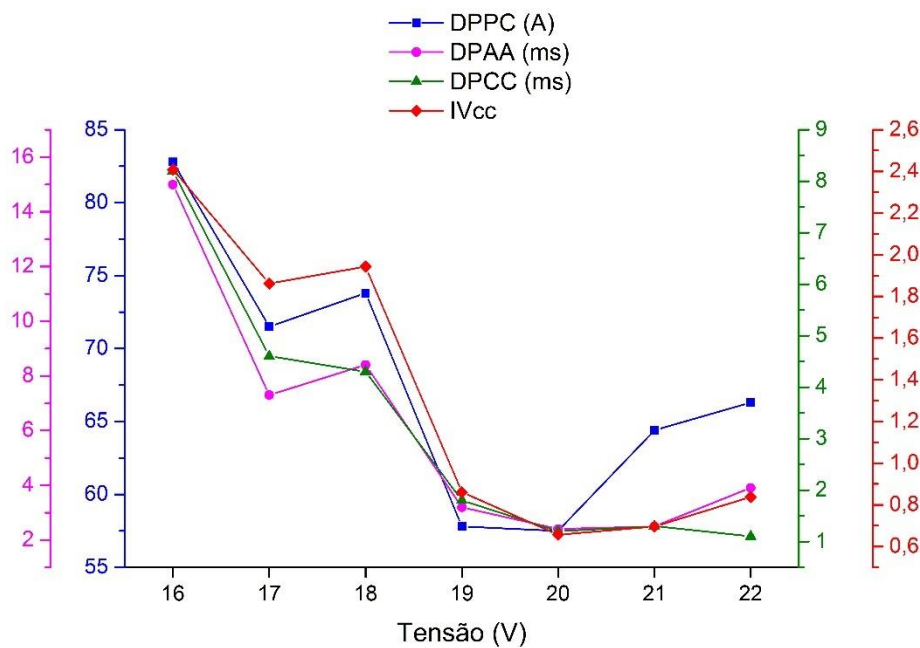


Figura 4.10: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão para o $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ com V_{alim} de 4,6 m/min.

Foi verificado que as tensões entre 16 e 18 V estão abaixo da faixa de trabalho estável do processo, que está compreendida entre as tensões de 19 e 22 V. Ao alterar a tensão de trabalho de 18 para 19 V houve um decréscimo brusco no valor dos índices, que exibiram uma nova redução, mais discreta, ao elevar a tensão para 20 V, sendo este o ponto de mínima do DPCC, DPAA e IVcc. Sendo assim, as soldas da segunda etapa com $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ e V_{alim} de 4,6 m/min foram realizadas com a tensão de 20 V.

g) $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ (V_{alim} 3,0 m/min)

Com base nos dados da Tabela 4.2, gerou-se o gráfico da Figura 4.11 que mostra a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada para as soldas realizadas com $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ e V_{alim} de 3,0 m/min.

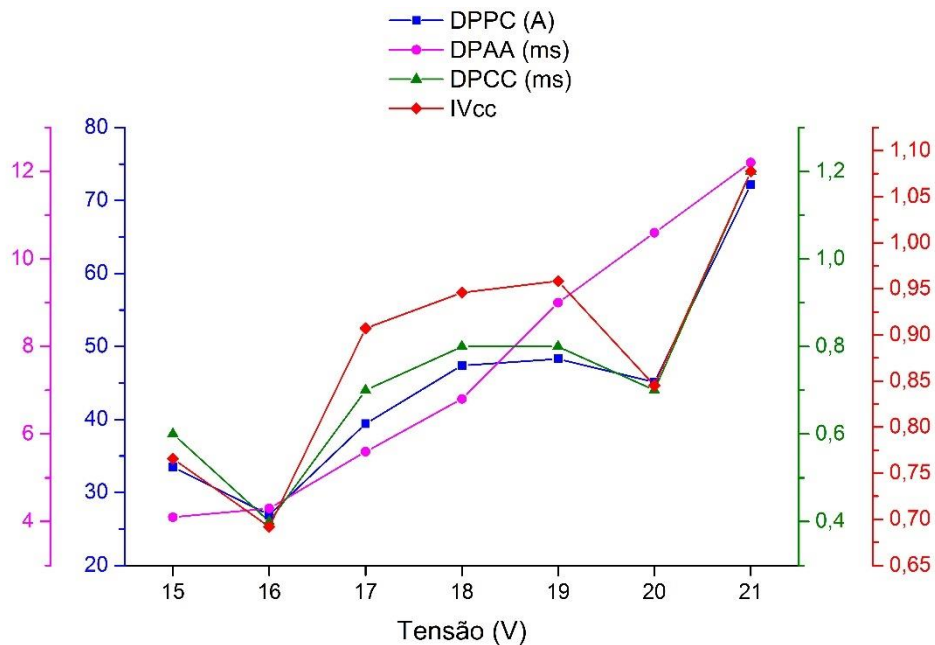


Figura 4.11: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão para o $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ com V_{alim} de 3,0 m/min.

Foi observado que a faixa de estabilidade da soldagem realizada com o $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ e V_{alim} de 3,0 m/min está entre 15 e 20 V. Não foi observada uma diferença expressiva entre o valor dos índices dentro da faixa estável do processo, exceto na tensão de 16 V que apresenta um ponto de congruência dos 4 índices, sendo que o DPPC, DPCC e o IVcc assumem os seus valores mínimos nessa tensão. O DPAA apresenta o seu valor mínimo na tensão de 15V, entretanto o mesmo possui um valor similar na tensão de 16 V. Conseqüentemente, a tensão de 16 V foi selecionada para realizar as soldas da segunda etapa com o $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ e V_{alim} de 3,0 m/min.

h) Ar+25%CO₂+1,5%H₂ (V_{alim} 4,6 m/min)

Com base nos dados da Tabela 4.2, gerou-se o gráfico da Figura 4.12 que mostra a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão utilizada para as soldas realizadas com Ar+25%CO₂+1,5%H₂ e V_{alim} de 4,6 m/min.

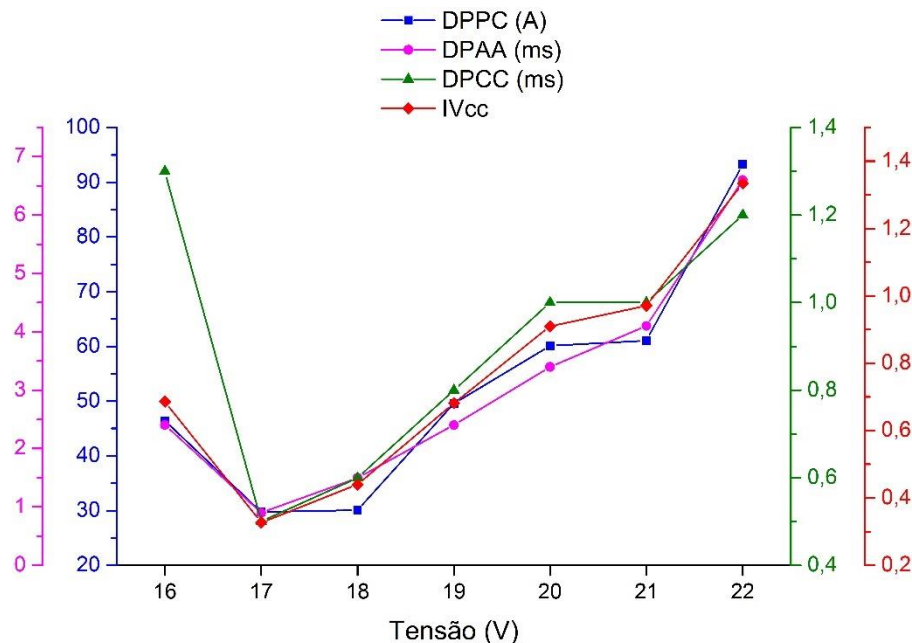


Figura 4.12: Variação do DPPC, DPAA, DPCC e IVcc de acordo com a tensão para o Ar+25%CO₂+1,5%H₂ com V_{alim} de 4,6 m/min.

Foi identificado que os índices apresentam uma faixa de estabilidade entre as tensões de 16 e 19 V, sendo que estes sofreram uma redução significativa em seus valores quando a tensão de soldagem foi alterada de 16 para 17 V, atingindo então o ponto de mínima. A partir daí, conforme a tensão era maior, os índices foram aumentando os seus valores (perdendo a estabilidade). Sendo assim, a tensão de 17 V foi selecionada para realizar as soldas da segunda etapa com o Ar+25%CO₂+1,5%H₂ e V_{alim} de 4,6 m/min.

De acordo com os resultados obtidos nesta avaliação quantitativa da estabilidade do processo, foi verificado que a medida que se aumenta a tensão a estabilidade tende a melhorar até atingir um ponto de máxima estabilidade, e a partir daí, ao aumentar a tensão a estabilidade piora, o que está de acordo com a literatura (Rezende et al.,2011; Modenesi, 2012).

A tabela Tabela 4.3 apresenta as faixas de tensões estáveis, conforme análise quantitativa, para os gases CO₂, Ar+25%CO₂, CO₂+3%H₂ e Ar+25%CO₂+1,5%H₂ com V_{alim} de 3,0 e 4,6 m/min.

Tabela 4.3: Faixa de tensão mais estável para cada gás de acordo com a análise quantitativa.

Gás	U (V)	
	V _{alim} 3,0 m/min	V _{alim} 4,6 m/min
CO ₂	17-19	19-22
Ar+25%CO ₂	15-17	17-19
CO ₂ +3%H ₂	19-21	19-22
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	15-20	16-19

Analisando a Tabela 4.3 foi observado que:

- Gases com maior teor de CO₂ exigem maior tensão de trabalho, o que está de acordo com a literatura (Scotti e Ponomarev, 2014; Zielinska et al., 2008), fato associado a maior necessidade de energia para a manutenção do arco (Souza et al., 2011).

- Soldas executadas, para um mesmo gás, com uma V_{alim} maior também exigem maior tensão de trabalho. Isso ocorre pois é necessário aumentar a tensão do arco para atingir a estabilidade em correntes mais elevadas (em função da maior V_{alim}), como consequência da própria característica estática do arco (Garcia e Scotti, 2011).

- A adição de 3% de H₂ no CO₂ com V_{alim} de 3,0 m/min deslocou a faixa de estabilidade do processo para maiores valores de tensão. Já para a V_{alim} de 4,6 m/min nenhuma alteração foi observada.

- A adição de 1,5% de H₂ no Ar+25%CO₂ tende a ampliar a faixa de estabilidade do processo para as duas velocidades de alimentação utilizadas.

- As faixas de estabilidade encontradas na análise quantitativa são similares àquelas observadas na qualitativa (Tabela 4.1), estando contidas nos intervalos de variação da qualitativa ou sendo iguais a estas.

4.1.4 Considerações da primeira etapa

- Foi verificado que os parâmetros selecionados estavam adequados, pois soldas estáveis foram obtidas para todos os gases. Além disso, foi confirmado pelos oscilogramas que as soldas foram realizadas no modo de transferência por curto-circuito.

- O comprimento do arco elétrico aumentou e o cordão de solda se tornou mais baixo e mais largo à medida que a tensão era maior.

- De acordo com a V_{alim} /corrente e o gás utilizado, foram identificadas, qualitativa e quantitativamente, faixas de tensões com boa estabilidade do processo. Ao utilizar tensões abaixo ou acima desta faixa, as soldas apresentaram instabilidades.

- Ao utilizar uma tensão muito abaixo da faixa de estabilidade do processo, o cordão de solda exibiu estreitamentos e o arco elétrico apresentou dificuldades em se manter aceso.

- Os índices de estabilidade DPPC, DPPA, DPCC e IV_{cc} apresentaram um comportamento semelhante à medida que a tensão de soldagem era alterada.

- À medida que a tensão de soldagem aumenta, a estabilidade do arco tende a melhorar até atingir um ponto de máxima estabilidade, que se degrada caso ocorra novos aumentos na tensão.

- A análise qualitativa da faixa de estabilidade do processo fornece resultados próximos ao da análise quantitativa.

4.2 Segunda etapa

O objetivo desta etapa foi comparar a estabilidade do processo de soldagem dos corpos de prova utilizando atmosferas de proteção de CO_2 e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ com suas misturas contendo hidrogênio, $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$, respectivamente.

4.2.1 Preparação e soldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados e limpos conforme o procedimento detalhado no item 3.2.2.1.

Após aplicar antirrespingo de solda nos corpos de prova e no coletor de respingos e alinhá-los em relação a tocha, as soldas foram realizadas com os parâmetros considerados mais estáveis na primeira etapa, apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros mais estáveis de cada gás selecionados na primeira etapa.

Gás	U (V)	
	V_{alim} 3,0 m/min	V_{alim} 4,6 m/min
CO_2	19	20
$\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$	20	20
$\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$	16	17
$\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$	16	17

Para facilitar a identificação dos corpos de prova, criou-se um código de identificação composto por dois números, que identificam o gás e a V_{alim} utilizada, e duas letras, que identificam o tipo de junta e a repetição do CP. A Figura 4.13 mostra como se compõe o código de identificação dos corpos de prova.

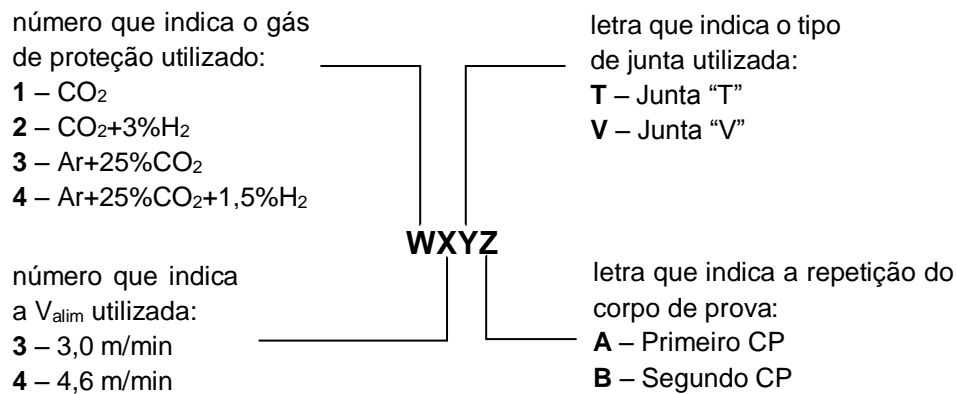


Figura 4.13: Composição do código de identificação dos corpos de prova.

4.2.2 Fabricação do coletor de respingos

Não foi encontrado na literatura um método padronizado para coleta dos respingos. Kang et al. (2003) utilizaram uma caixa que envolvia completamente a tocha e o corpo de prova para evitar que respingos não fossem coletados. Fernandes et al. (2010) usaram um coletor formado por uma caixa coletora, que separa os respingos de acordo com o seu alcance, e por uma coifa extensora da área de coleta. Tatagiba (2015) e Menezes (2016) utilizaram um coletor (Figura 4.14) similar ao utilizado por Fernandes et al. (2010), entretanto foi relatado que respingos caíram fora do coletor. Esse tipo de coletor possuía dimensões avantajadas, o que impossibilitou o uso deste no presente trabalho devido ao espaço limitado no local de realização das soldas.

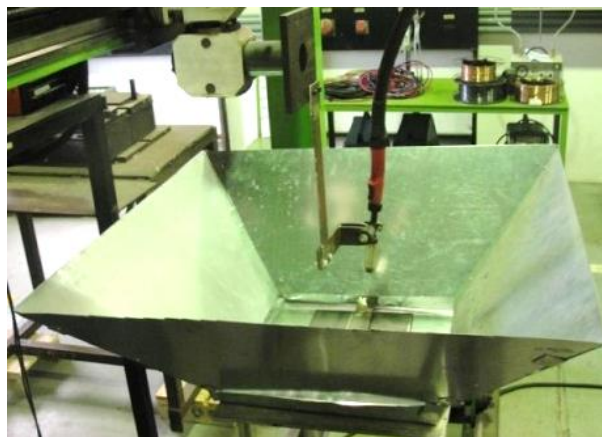


Figura 4.14: Coletor de respingos.

Fonte: Tatagiba (2015)

Um fator que aumentou a complexidade do projeto foi que, diferentemente dos trabalhos citados em que a solda foi realizada sobre a chapa, as soldas foram realizadas em juntas (“T” e “V”) e posições de soldagem (plana e horizontal) diferentes. Portanto, foi desenvolvido um novo formato de coletor de respingos, com dimensões apropriadas ao espaço físico disponível e com tampas em sua parte superior que se deslocavam, de acordo com a junta que estivesse sendo soldada, juntamente com a tocha para minimizar a chance de alguns respingos não serem coletados. Sendo assim, após o posicionamento do CP e do ajuste da DBCP, o coletor de respingos era tampado, não sendo possível observar a realização da solda. A Figura 4.15 mostra o coletor de respingos fabricado.

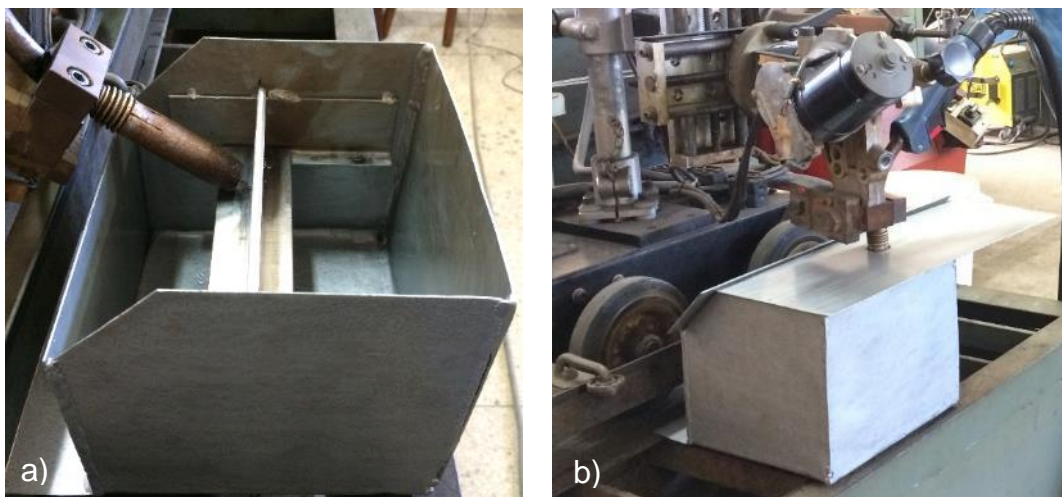










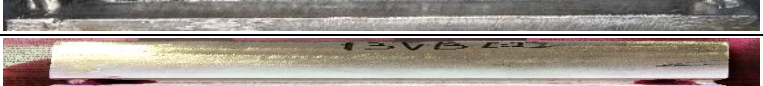
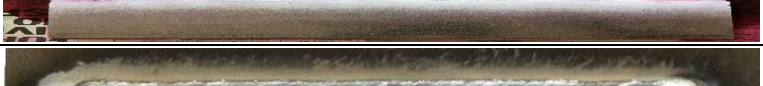

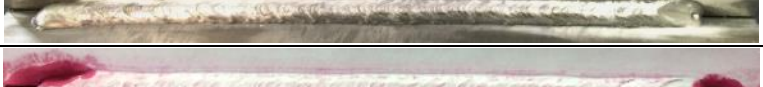






















































Figura 4.15: Coletor de respingos com: a) junta “T” e sem as tampas; b) junta “V” e tampado.

























4.2.3 Análise qualitativa dos cordões de solda

A Figura 4.16 mostra os cordões de solda realizados com os gases de proteção e parâmetros de soldagem regulados na máquina, conforme Tabela 4.4, em três condições: após a soldagem (sujo), após a preparação para ensaio visual e por líquido penetrante (limpo) e após o ensaio de líquido penetrante (LP).

CP	Condição	Foto
13TA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
13TB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
13VA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
13VB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
14TA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
14TB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
14VA	Sujo	
	Limpo	
	LP	

14VB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
23TA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
23TB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
23VA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
23VB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
24TA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
24TB	Sujo	
	Limpo	
	LP	

24VA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
24VB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
33TA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
33TB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
33VA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
33VB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
34TA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
34TB	Sujo	
	Limpo	
	LP	

34VA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
34VB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
43TA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
43TB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
43VA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
43VB	Sujo	
	Limpo	
	LP	
44TA	Sujo	
	Limpo	
	LP	
44TB	Sujo	
	Limpo	
	LP	

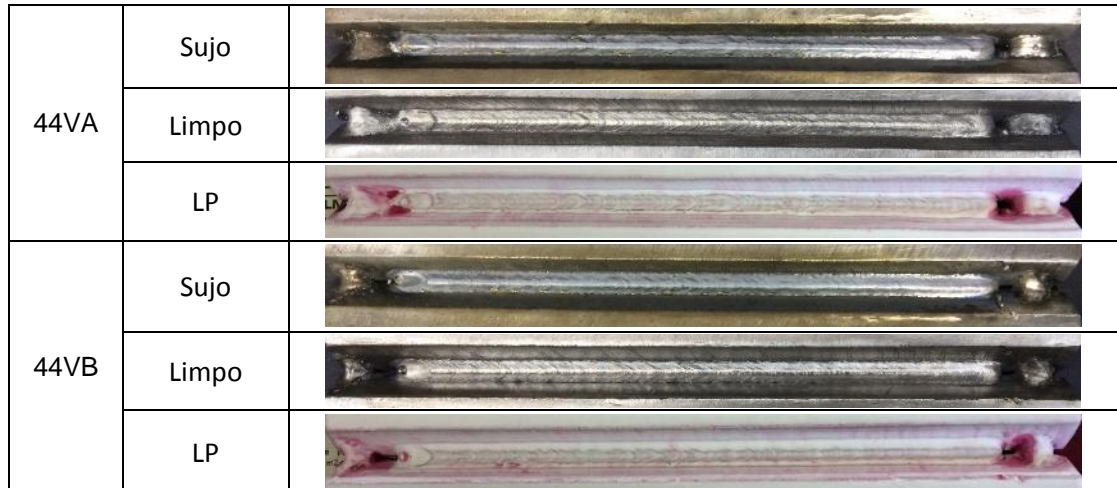


Figura 4.16: Cordões de solda executados na segunda etapa.

Após a soldagem dos corpos de prova, foi possível observar que em todos havia uma certa quantidade de respingos aderidos nas chapas e alguma escória no cordão de solda. Visualmente, assim como na primeira etapa, a quantidade de respingos e escória com os gases CO_2 puro e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ foi maior que com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$, o que está de acordo com Menezes (2016) e Liskevych e Scotti (2015).

Como nesta segunda etapa utilizou-se o coletor de respingos, de forma que as soldas eram realizadas sem abertura para a atmosfera, foi avaliada melhor (qualitativamente) a quantidade de fumos gerados, pois quando se removia as tampas do coletor, parte dos fumos que ficou aprisionado era liberado para a atmosfera. Dessa forma, foi observado que além da quantidade de respingos e escória aparentemente maiores, a quantidade de fumos para os gases CO_2 puro e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ também foi maior que com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$, estando de acordo com Liskevych e Scotti (2015) e Carpenter, Monaghan e Norrish (2009).

Os ensaios não destrutivos de inspeção visual e LP permitiram identificar a ocorrência de falta de fusão nos CPs: 13TB, 23TA, 33TA, 33TB, 33VA, 33VB; e um único e pequeno poro no CP 24VB. Nota-se que a falta de fusão ocorreu somente nos corpos de prova com V_{alim} de 3,0 m/min. Sendo assim, esta descontinuidade possivelmente está associada à baixa energia de soldagem utilizada. A solução para evitar tal descontinuidade seria diminuir a velocidade de soldagem, mantendo a $V_{\text{alim}}=3,0$ m/min, ou aumentar a V_{alim} , mantendo a velocidade de soldagem em 30 cm/min.

Não foi identificada diferença significativa no aspecto dos cordões de solda com a adição de H_2 no $Ar+25\%CO_2$, assim como no trabalho de Menezes (2016), exceto pela detecção de falta de fusão em soldas com o $Ar+25\%CO_2$ o que não ocorreu com o $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$. Isso sugere que a adição do hidrogênio fez com que o calor da solda fosse suficiente para fundir o metal base mesmo com baixa energia de soldagem. Sendo o H_2 um gás molecular, tanto na sua dissociação como na ionização o mesmo absorve energia na parte superior do arco elétrico (processo endotérmico). Mas ao chegarem na região catódica do arco, próxima à poça de solda, que é relativamente mais fria, os átomos se recombinaem e liberam energia (processo exotérmico), aumentando assim o calor nesta região. Além disso, o H_2 possui uma elevada condutividade térmica, ou seja, consegue transferir maior quantidade de calor para a peça (Scotti e Ponomarev 2014; Suban e Tušek, 2001).

Assim como no $Ar+25\%CO_2$, a adição de H_2 no CO_2 não gerou mudança expressiva no aspecto do cordão de solda, o que também foi observado por Tatagiba (2015). A influência do H_2 na produção de respingos não foi detectada qualitativamente, mas será melhor avaliada na análise quantitativa do item 4.2.4.

4.2.4 Avaliação da quantidade de respingos gerados

A Figura 4.17 apresenta os respingos coletados durante a soldagem dos corpos de prova e a Tabela 4.5 apresenta a taxa de respingos juntamente com os dados utilizados para o seu cálculo de acordo com a Equação 3.1.

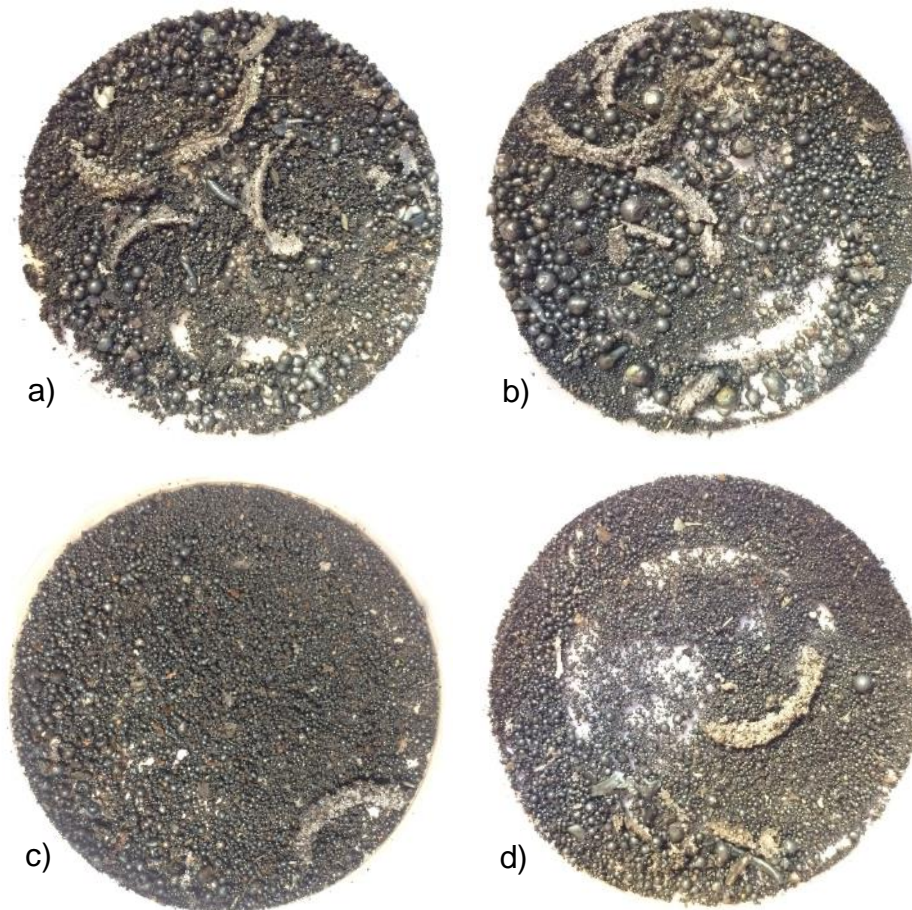


Figura 4.17: Respingos coletados para os gases: a) CO_2 ; b) $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$; c) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$; d) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.

Tabela 4.5: Taxa de respingos e dados utilizados para o cálculo.

Gás de proteção	Massa dos respingos (g)	Somatório do tempo de soldagem (min)	Taxa de respingos (g/min)
CO_2	9,623	4,72	2,040
$\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$	9,934	4,68	2,122
$\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$	7,944	4,76	1,671
$\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$	6,257	4,56	1,371

A análise desses resultados permitiu observar que a adição de 3% de H_2 no gás CO_2 não gerou alteração significativa em relação à taxa de respingos, ou seja, o $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ gerou uma taxa de 0,082 g/min (4%) maior que o CO_2 puro. Entretanto,

de forma qualitativa foi identificado que o gás contendo H_2 gerou respingos de maior tamanho em relação ao gás convencional. Já Menezes (2016) encontrou uma redução na taxa de respingos devido à adição de 4% de H_2 no CO_2 .

Por outro lado, a adição de 1,5% de H_2 no gás $Ar+25\%CO_2$ gerou uma redução de 0,299 g/min (18%) na taxa de respingos, o que está de acordo com Menezes (2016). Não foi observada modificação significativa em relação ao tamanho dos respingos gerados.

Ao se comparar os gases CO_2 e $CO_2+3\%H_2$ com o $Ar+25\%CO_2$ e o $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ fica evidente o aumento não só nos tamanhos, mas também na quantidade de respingos gerados, estando de acordo com Menezes (2016), fato que pode ser explicado devido ao rompimento mais intenso do contato líquido entre o eletrodo e a poça e às oscilações mais expressivas na poça de fusão (Liskevych e Scotti, 2015).

4.2.5 Taxa de deposição

A Tabela 4.6 apresenta a corrente média registrada no SAP (I_m), a quantidade de metal depositado e o tempo de soldagem de cada CP, possibilitando assim o cálculo da taxa de deposição conforme a Equação 3.2.

Tabela 4.6: Taxa de deposição e dados utilizados para o cálculo.

CP	I_m (A)	Tempo de soldagem (s)	Peso			Taxa de deposição (kg/h)
			Antes da solda (g)	Após limpeza da solda (g)	Metal depositado (g)	
13TA	126,2	34,88	942,2	956,9	14,7	1,517
13TB	123,6	36,67	956,6	971,5	14,9	1,463
13VA	132,4	36,33	2989,5	3005,0	15,5	1,536
13VB	128,5	35,21	2967,9	2982,9	15,0	1,534
14TA	186,5	36,13	945,4	969,2	23,8	2,371
14TB	181,8	35,49	933,3	956,8	23,5	2,384
14VA	185,4	34,88	2985,1	3008,6	23,5	2,425
14VB	185,2	33,40	2984,7	3005,8	21,1	2,274
23TA	126,8	36,01	956,6	973,1	16,5	1,650
23TB	129,9	35,11	956,9	973,3	16,4	1,682
23VA	137,2	33,05	2946,7	2962,1	15,4	1,677
23VB	133,4	34,57	2988,4	3004,1	15,7	1,635
24TA	180,2	35,67	956,7	980,7	24,0	2,422
24TB	173,7	35,74	948,3	971,1	22,8	2,297
24VA	195,3	36,45	2992,2	3016,8	24,6	2,430
24VB	187,7	34,23	2973,9	2997,0	23,1	2,429
33TA	128,9	36,92	952,8	968,5	15,7	1,531
33TB	135,5	37,42	936,9	950,8	13,9	1,337
33VA	127,0	34,62	2992,0	3004,7	12,7	1,321
33VB	128,6	34,48	2982,7	2996,6	13,9	1,451
34TA	195,4	37,57	958,9	984,1	25,2	2,415
34TB	195,6	37,10	954,9	976,7	21,8	2,115
34VA	203,0	33,73	3063,3	3083,6	20,3	2,167
34VB	198,2	33,46	2933,1	2954,3	21,2	2,281
43TA	131,8	34,97	945,8	961,0	15,2	1,565
43TB	128,9	36,18	952,6	968,6	16,0	1,592
43VA	124,3	33,29	3008,1	3021,6	13,5	1,460
43VB	132,8	33,30	2939,0	2953,8	14,8	1,600
44TA	187,8	33,90	974,6	998,0	23,4	2,485
44TB	188,4	34,99	948,7	972,7	24,0	2,469
44VA	197,9	33,48	2901,2	2923,6	22,4	2,409
44VB	191,4	33,67	2980,5	3004,3	23,8	2,545

Com base na Tabela 4.6 foram gerados os gráficos apresentados na Figura 4.18, que permite melhor avaliar a variação da taxa de deposição em função do gás de proteção e da velocidade de alimentação de arame utilizada.

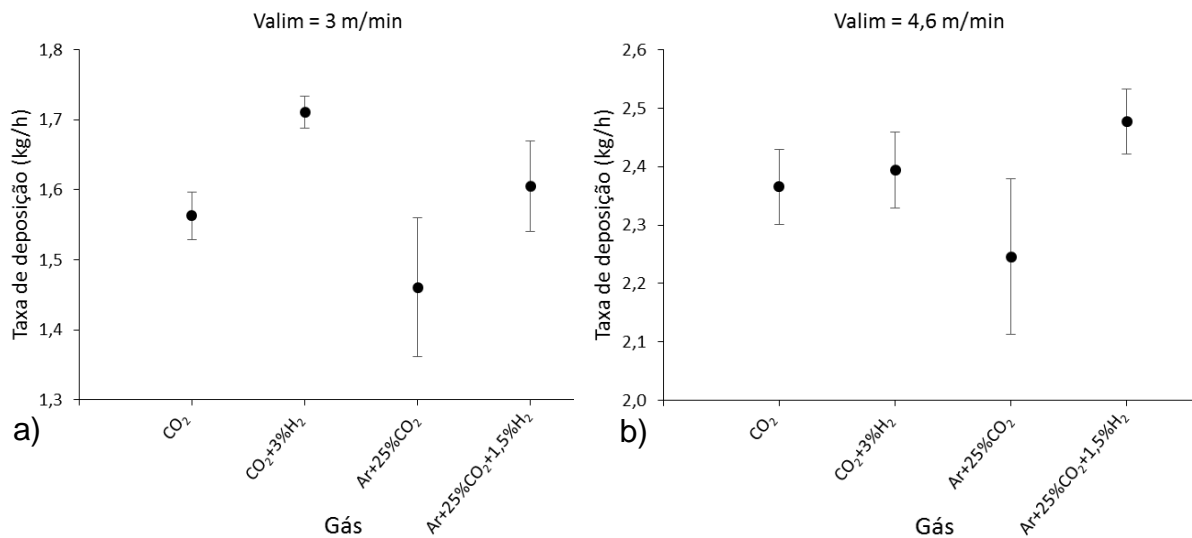


Figura 4.18: Taxa de deposição de acordo com o gás de proteção para: a) $V_{alim} = 3 \text{ m/min}$; b) $V_{alim} = 4,6 \text{ m/min}$.

Quando a V_{alim} utilizada é de 4,6 m/min, verifica-se que a taxa de deposição de todos os gases é superior ao encontrado na V_{alim} de 3,0 m/min, possuindo inclusive escalas diferentes nos gráficos. Este resultado já era esperado pelo fato de que a quantidade de arame alimentado, e consequentemente a corrente, aumentou, mas a velocidade de soldagem foi a mesma (Bracarense, 2014; Fortes e Vaz, 2005).

Com a $V_{alim} = 3 \text{ m/min}$ foi observada uma tendência em aumentar a taxa de deposição quando é adicionado 3% de H₂ no CO₂ puro, e 1,5% de H₂ no Ar+25%CO₂. A maior taxa de deposição do CO₂+3%H₂ em relação ao CO₂ puro pode ter sido levemente influenciada devido à sua corrente média de soldagem ligeiramente maior. Entretanto, o Ar+25%CO₂+1,5%H₂ apresenta maior taxa de deposição em relação ao Ar+25%CO₂ mesmo com corrente média de soldagem semelhante.

Para a $V_{alim} = 4,6 \text{ m/min}$ esta tendência de aumentar a taxa de deposição também é facilmente observada no caso da adição de 1,5% de H₂ no Ar+25%CO₂, apesar de o Ar+25%CO₂+1,5%H₂ apresentar uma corrente média de soldagem levemente inferior em relação ao gás convencional. Já o CO₂ possui valores de taxa de deposição e corrente média similares ao da sua mistura contendo 3% H₂.

Esse aumento na taxa de deposição pode estar relacionado à maior condutividade térmica do H₂ e as suas reações de dissociação (endotérmica) e

associação (exotérmica) em diferentes regiões do arco, assim como ocorreu no item 4.2.3, onde por esses mesmos motivos a adição de H_2 eliminou a falta de fusão observada nos corpos de prova soldados com $Ar+25\%CO_2$ (Scotti e Ponomarev, 2014; Suban e Tušek, 2001).

4.2.6 Avaliação da estabilidade do arco elétrico

Nesta segunda etapa, foram realizadas soldas em juntas de topo com chanfro “V” na posição plana e soldas de filete em juntas “T” na posição horizontal ao invés da simples deposição do cordão de solda sobre a chapa. Sendo assim, antes de avaliar o efeito da adição do H_2 nos gases de proteção, foi verificado se a diferença na geometria dos corpos de prova e na posição de soldagem teve algum efeito na estabilidade do arco elétrico. Para isso, foram utilizados os índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IV_{cc} para comparar as soldas executadas nas juntas “T” com as realizadas nas juntas “V”, para cada gás e V_{alim} utilizada. Estes índices também foram utilizados para comparar as soldas da segunda etapa (corpos de prova) com as da primeira etapa (deposição sobre a chapa).

4.2.6.1 Comparação entre as juntas

A Tabela 4.7 apresenta os seguintes dados das soldas realizadas na segunda etapa: valor médio dos picos de corrente (I_p), desvio padrão dos picos de corrente (DPPC), média do tempo de arco aberto (t_{ab}), desvio padrão dos períodos de arco aberto (DPAA), média do tempo de curto-circuito (t_{cc}), desvio padrão dos períodos de curto-circuito (DPCC) e o Índice de Vilarinho de Regularidade da Transferência em curto-circuito (IV_{cc}).

Tabela 4.7: Média dos sinais elétricos e índices de estabilidade dos corpos de prova soldados na segunda etapa.

CP	I _p (A)	DPPC (A)	t _{ab} (ms)	DPAA (ms)	t _{cc} (ms)	DPCC (ms)	IV _{cc}
13TA	293,1	52,5	10,7	5,8	2,1	0,8	0,92
13TB	284,2	57,0	10,8	5,8	2,0	0,9	0,99
13VA	296,6	54,0	11,8	6,8	1,9	0,8	1,00
13VB	286,5	50,3	11,0	6,0	1,9	0,8	0,97
14TA	365,5	64,9	9,1	4,3	2,5	1,2	0,95
14TB	363,3	60,3	8,4	3,6	3,1	1,5	0,91
14VA	350,3	56,6	8,1	3,8	2,2	1,0	0,92
14VB	354,1	56,6	8,6	4,3	2,1	1,0	0,98
23TA	311,1	52,8	11,2	7,3	2,3	1,1	1,13
23TB	300,0	53,7	9,9	5,5	2,2	0,9	0,96
23VA	300,7	56,5	11,1	5,9	1,9	0,8	0,95
23VB	306,7	57,6	12,3	7,2	2,0	0,9	1,04
24TA	357,9	62,5	8,3	3,8	2,8	1,4	0,96
24TB	353,5	59,7	8,6	4,3	2,8	1,4	1,00
24VA	371,2	64,4	8,1	3,7	2,6	1,2	0,92
24VB	366,5	55,3	8,5	3,8	2,6	1,1	0,87
33TA	292,3	22,1	17,6	4,3	2,5	0,4	0,40
33TB	297,1	31,7	14,1	4,1	2,5	0,6	0,53
33VA	319,7	20,2	18,9	4,3	3,0	0,6	0,43
33VB	319,6	20,7	19,5	4,5	3,0	0,5	0,40
34TA	329,4	46,1	7,4	2,9	2,3	0,9	0,78
34TB	330,0	48,2	7,4	3,2	2,2	0,9	0,84
34VA	340,9	44,6	7,3	3,5	2,2	0,9	0,89
34VB	334,9	46,5	7,4	3,7	2,3	1,0	0,93
43TA	279,3	30,7	11,2	5,1	2,5	0,7	0,74
43TB	277,9	30,0	11,8	5,6	2,6	0,8	0,78
43VA	309,0	24,8	15,9	4,0	3,2	0,6	0,44
43VB	295,9	32,0	14,6	5,8	2,7	0,7	0,66
44TA	332,3	38,8	7,8	3,4	2,9	1,0	0,78
44TB	321,6	34,9	6,8	2,4	2,8	0,8	0,64
44VA	336,8	40,1	7,2	2,7	2,5	0,9	0,74
44VB	332,5	39,1	8,0	3,4	2,5	0,9	0,79

Com os índices da tabela Tabela 4.7, foi realizado o teste t de Student ($p < 0,05$) para avaliar se há diferença significativa na estabilidade do arco elétrico entre as soldas realizadas, com os mesmos parâmetros, nas juntas “V” (posição plana) e “T” (posição horizontal). A Tabela 4.8 apresenta os valores de p obtidos. Os valores menores que 0,05 foram destacados e indicam uma diferença significativa na comparação entre as juntas.

Tabela 4.8: Valores de p obtidos na comparação entre os índices de estabilidade das juntas “V” e “T”.

Gás	V _{alim} (m/min)	DPPC (A)	DPAA (ms)	DPCC (ms)	IVcc
CO ₂	3,0	0,4663	0,2724	0,4230	0,5133
	4,6	0,1209	0,8378	0,1448	0,6349
CO ₂ +3%H ₂	3,0	0,0332	0,9049	0,3118	0,6550
	4,6	0,8175	0,3604	0,0377	0,1174
Ar+25%CO ₂	3,0	0,3117	0,2929	0,6985	0,5317
	4,6	0,3758	0,0927	0,4230	0,1091
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	3,0	0,6438	0,6775	0,2929	0,2011
	4,6	0,3052	0,8288	0,9996	0,5364

Das trinta e duas comparações entre juntas “V” e “T”, apenas duas apresentaram diferença significativa: aumento do DPPC com o CO₂+3%H₂ e V_{alim} de 3,0 m/min e; redução do DPCC com o CO₂+3%H₂ e V_{alim} de 4,6 m/min. De forma geral, não foi identificada uma tendência em alterar a estabilidade do arco elétrico em função do tipo de junta e posição que foi soldada. Na maioria dos casos, os índices apresentaram valores próximos, hora ocorrendo uma ligeira redução e hora um pequeno aumento dos valores. Essa aleatoriedade ocorreu para todos os gases de proteção independentemente da V_{alim} utilizada.

Sendo assim, para comparar a estabilidade do arco elétrico dos corpos de prova soldados com gases de proteção convencionais com suas respectivas misturas contendo H₂ optou-se por agrupar os resultados das juntas “T” e “V” de um mesmo gás e V_{alim}. Aumentando assim o número de corpos de prova de dois para quatro em cada grupo a ser comparado.

4.2.6.2 Comparação entre os gases

A Tabela 4.9 apresenta os índices de estabilidade DPPC, DPAA DPCC e Ivcc, contendo suas respectivas médias e erros (que fornecem a diferença entre o maior e menor valor e a média), dos corpos de prova soldados com CO₂, CO₂+3%H₂, Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+1,5%H₂ e V_{alim} = 3,0 m/min.

Tabela 4.9: Índices de estabilidade com suas médias e erros para cada gás, utilizando V_{alim} = 3,0 m/min.

Gás	TA	TB	VA	VB	Média	erro +	erro -
	DPPC						
CO ₂	52,5	57,0	54,0	50,3	53,5	3,6	3,2
CO ₂ +3%H ₂	52,8	53,7	56,5	57,6	55,2	2,5	2,4
Ar+25%CO ₂	22,1	31,7	20,2	20,7	23,7	8,0	3,5
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	30,7	30,0	24,8	32,0	29,4	2,6	4,6
Gás	DPAA				Média	erro +	erro -
CO ₂	5,8	5,8	6,8	6,0	6,1	0,7	0,3
CO ₂ +3%H ₂	7,3	5,5	5,9	7,2	6,5	0,8	1,0
Ar+25%CO ₂	4,3	4,1	4,3	4,5	4,3	0,2	0,2
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	5,1	5,6	4,0	5,8	5,1	0,7	1,1
Gás	DPCC				Média	erro +	erro -
CO ₂	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,1	0,0
CO ₂ +3%H ₂	1,1	0,9	0,8	0,9	0,9	0,2	0,1
Ar+25%CO ₂	0,4	0,6	0,6	0,5	0,5	0,1	0,1
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	0,7	0,8	0,6	0,7	0,7	0,1	0,1
Gás	Ivcc				Média	erro +	erro -
CO ₂	0,92	0,99	1,00	0,97	1,0	0,03	0,05
CO ₂ +3%H ₂	1,13	0,96	0,95	1,04	1,0	0,11	0,07
Ar+25%CO ₂	0,40	0,53	0,43	0,40	0,4	0,09	0,04
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	0,74	0,78	0,44	0,66	0,7	0,13	0,22

Com base na Tabela 4.9, gerou-se os gráficos da Figura 4.19 que mostram a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e Ivcc de acordo com o gás de proteção utilizado para as soldas realizadas com V_{alim} de 3,0 m/min.

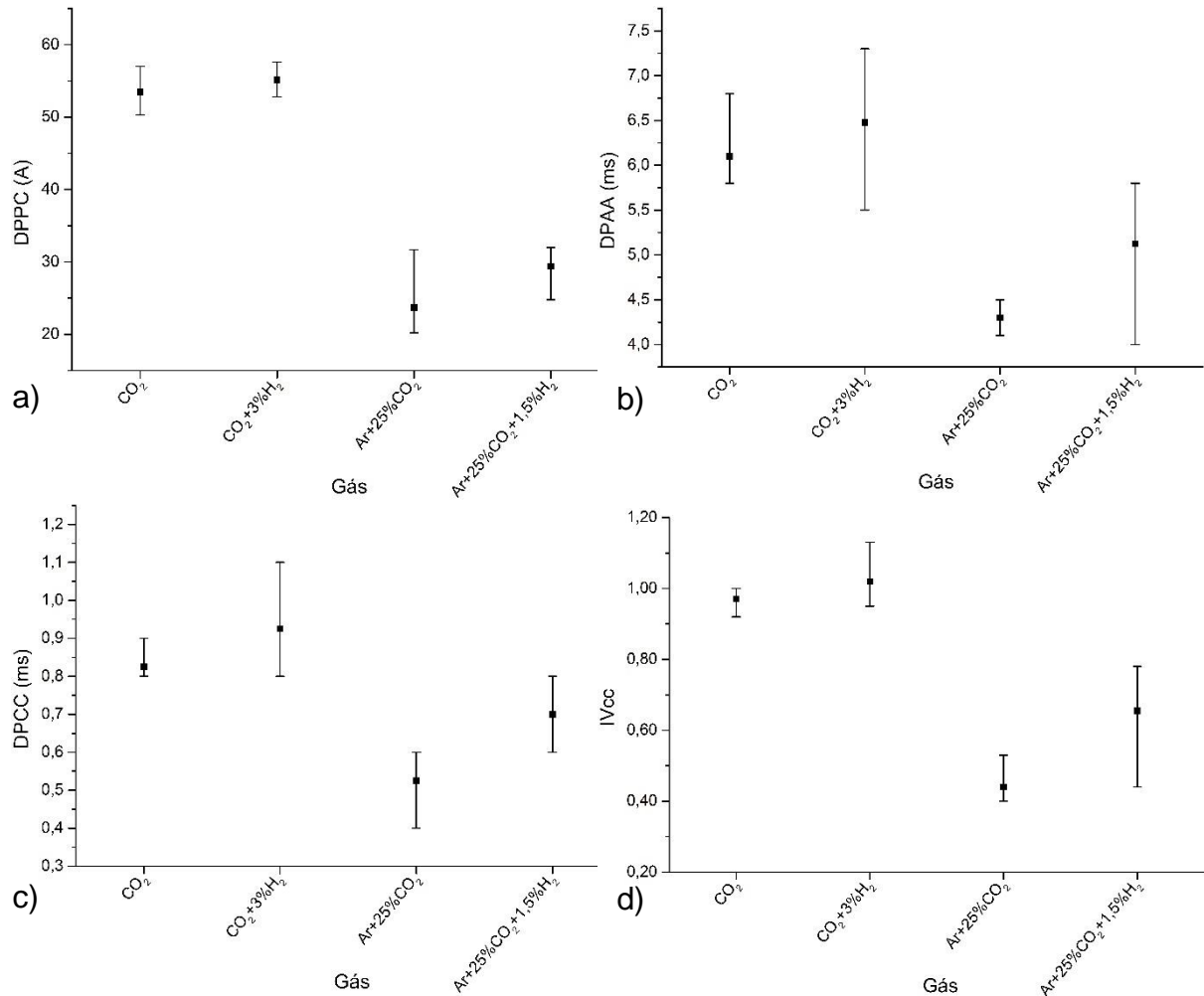


Figura 4.19: Variação dos índices de estabilidade de acordo com a atmosfera de proteção utilizada na soldagem com $V_{alim} = 3,0$ m/min: a) DPPC; b) DPAA; c) DPCC; d) Ivcc.

Foi identificado com esses resultados que há uma perda de estabilidade do arco elétrico ao soldar com os gases CO_2 e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ em relação as soldas realizadas com o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$, ou seja, ocorre uma redução da estabilidade do arco elétrico ao se executar as soldas com os gases de maior teor de CO_2 , o que está de acordo com os resultados de Menezes (2016) e Tatagiba (2015).

Não foram identificadas alterações significativas dos índices de estabilidade devido a adição de 3% de H_2 no CO_2 puro, porém foi observado que os índices do CO_2 apresentaram médias ligeiramente inferiores aos do $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$. Este resultado está em desacordo com Tatagiba (2015) e Menezes (2016), que encontraram uma melhora de estabilidade com a adição de H_2 . Entretanto, esses autores acrescentaram

4% de H₂ ao invés de 3% e trabalharam com uma faixa de corrente e tensão mais elevada.

A adição de 1,5% de H₂ no Ar+25%CO₂ gerou uma leve tendência de reduzir a estabilidade do arco elétrico, sendo mais notória uma elevação na média dos índices DPAA, DPCC e Ivcc do que no DPPC, que apesar de ter sofrido uma pequena elevação em sua média, reduziu a variação dos resultados. Este resultado está de acordo com Menezes (2016), que apesar de ter identificado um pequeno aumento nas médias dos índices devido a adição de H₂, após realizar o teste *t*, concluiu que não havia diferença significativa entre o Ar+25%CO₂ e o Ar+25%CO₂+2%H₂.

A Tabela 4.10 apresenta os índices de estabilidade DPCC, DPAA DPCC e Ivcc, contendo suas respectivas médias e erros (que fornecem a diferença entre o maior e menor valor e a média), dos corpos de prova soldados com CO₂, CO₂+3%H₂, Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+1,5%H₂ e V_{alim} = 4,6 m/min,

Tabela 4.10: Índices de estabilidade com suas médias e erros para cada gás, utilizando V_{alim} = 4,6 m/min.

Gás	TA	TB	VA	VB	Média	erro +	erro -
	DPPC						
CO ₂	64,9	60,3	56,6	56,6	59,6	5,3	3,0
CO ₂ +3%H ₂	62,5	59,7	64,4	55,3	60,5	3,9	5,2
Ar+25%CO ₂	46,1	48,2	44,6	46,5	46,4	1,9	1,8
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	38,8	34,9	40,1	39,1	38,2	1,9	3,3
Gás	DPAA				Média	erro +	erro -
CO ₂	4,3	3,6	3,8	4,3	4,0	0,3	0,4
CO ₂ +3%H ₂	3,8	4,3	3,7	3,8	3,9	0,4	0,2
Ar+25%CO ₂	2,9	3,2	3,5	3,7	3,3	0,4	0,4
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	3,4	2,4	2,7	3,4	3,0	0,4	0,6
Gás	DPCC				Média	erro +	erro -
CO ₂	1,2	1,5	1,0	1,0	1,2	0,3	0,2
CO ₂ +3%H ₂	1,4	1,4	1,2	1,1	1,3	0,1	0,2
Ar+25%CO ₂	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,1	0,0
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	1,0	0,8	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1
Gás	Ivcc				Média	erro +	erro -
CO ₂	0,95	0,91	0,92	0,98	0,9	0,04	0,03
CO ₂ +3%H ₂	0,96	1,00	0,92	0,87	0,9	0,06	0,07
Ar+25%CO ₂	0,78	0,84	0,89	0,93	0,9	0,07	0,08
Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂	0,78	0,64	0,74	0,79	0,7	0,05	0,10

Com base na Tabela 4.10, gerou-se os gráficos da Figura 4.20 que mostram a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e Ivcc de acordo com o gás de proteção utilizado para as soldas realizadas com V_{alim} de 4,6 m/min.

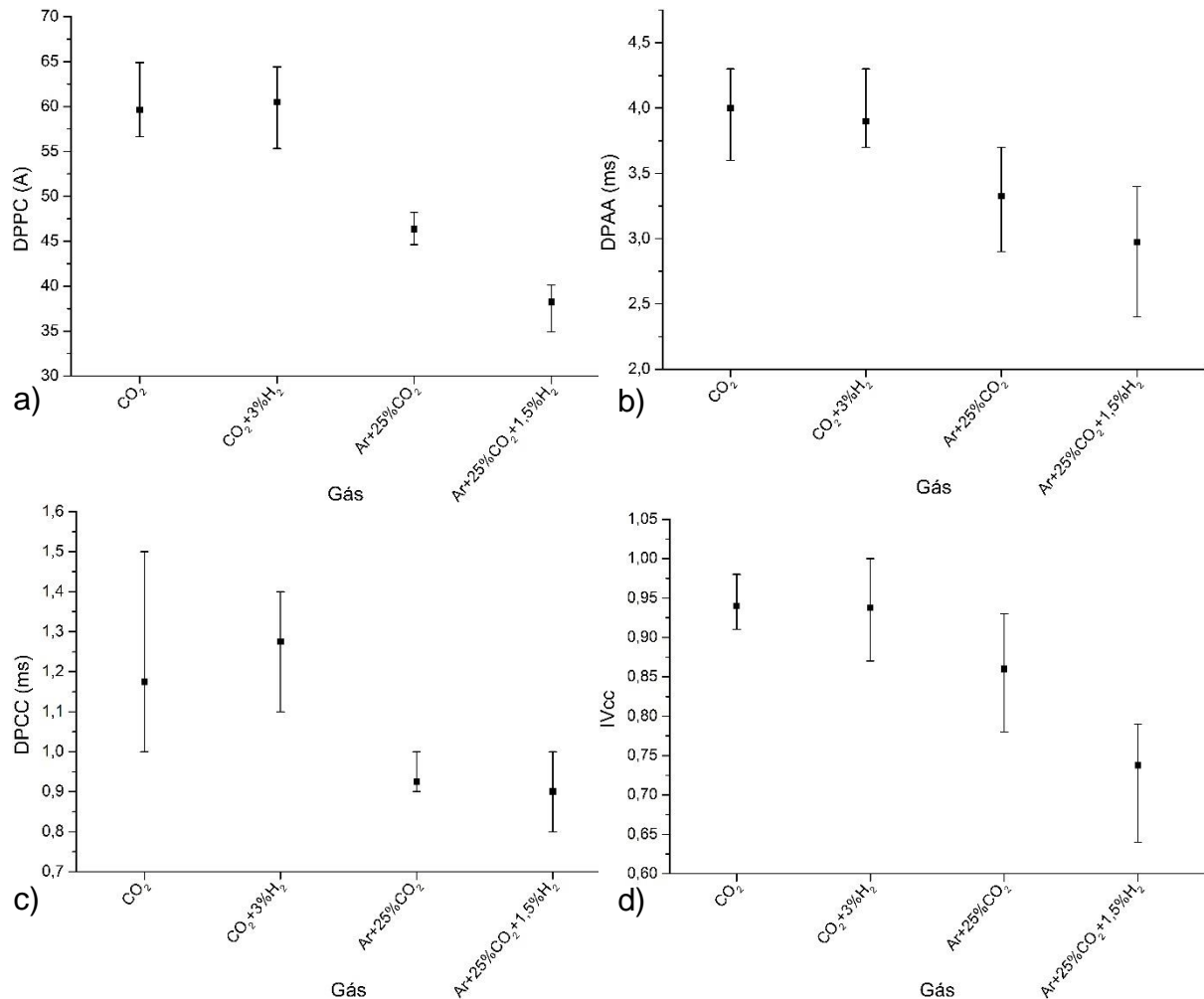


Figura 4.20: Variação dos índices de estabilidade de acordo com a atmosfera de proteção utilizada na soldagem com $V_{alim} = 4,6$ m/min: a) DPPC; b) DPAA; c) DPCC; d) Ivcc.

As soldas realizadas com os gases CO_2 e $CO_2+3\%H_2$ apresentaram, outra vez, maiores valores dos índices de estabilidade quando comparados com as soldas executadas com $Ar+25\%CO_2$ e $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$. Porém, a diferença observada foi menos expressiva com a V_{alim} de 4,6 m/min do que com a de 3,0 m/min. Sendo assim, foi identificada uma redução, menos significativa, da estabilidade do arco nas soldas executadas com os gases de maior teor de CO_2 .

Novamente, não foi possível detectar alterações significativas dos índices de estabilidade devido adição de 3% de H_2 no CO_2 puro. Entretanto, diferentemente do

caso anterior (V_{alim} de 3,0 m/min) onde identificou-se uma média nos quatro índices do gás contendo H_2 levemente maior, agora com a V_{alim} de 4,6 m/min isso não foi observado. As médias e as variações ficaram ainda mais próximas, tendo, inclusive, o DPAA do $CO_2+3\%H_2$ uma média ligeiramente menor que a do CO_2 puro.

A adição de 1,5% de H_2 no $Ar+25\%CO_2$ com a V_{alim} de 4,6 m/min, opostamente ao que foi observado com a V_{alim} de 3,0 m/min, gerou uma tendência de melhorar a estabilidade do arco elétrico, sendo este aumento na estabilidade mais notório através dos índices DPPC, DPAA e I_{vcc} do que no DPCC. Este resultado está de acordo com Tatagiba (2015), que na adição de 2% de H_2 no $Ar+25\%CO_2$ identificou uma melhora da estabilidade do arco elétrico.

Esses resultados sugerem que os gases com adições de hidrogênio possuem melhor estabilidade do arco elétrico quando operam em faixas de corrente/ V_{alim} e tensão mais elevadas. Ribeiro (2016) em seu trabalho sobre o efeito da adição do propileno (C_3H_6) em gases convencionais no processo GMAW, também identificou essa tendência de melhor comportamento da soldagem nas misturas contendo o referido gás quando foi utilizado valores mais elevados de corrente/ V_{alim} e tensão.

Além disso, indicativos quanto aos teores de H_2 mais apropriados para adição no CO_2 e $Ar+25\%CO_2$ também podem ser obtidos. Tatagiba (2015) e Menezes (2016) adicionaram, respectivamente, 4% e 2% de H_2 no CO_2 e no $Ar+25\%CO_2$ e obtiveram melhores resultados de estabilidade do arco para o CO_2 contendo H_2 do que o CO_2 puro. Já nesta etapa verificou-se que a adição de 3% de H_2 no CO_2 não gerou modificações significativas mesmo com V_{alim} de 4,6 m/min. Acredita-se então que 3% pode não ser o suficiente para reduzir o potencial de oxidação do CO_2 a um nível em que haja melhoria do processo. Contudo, o oposto é observado para o teor de 1,5% de H_2 no $Ar+25\%CO_2$. Tatagiba (2015) encontrou uma melhora da estabilidade com a adição de 2%, já Menezes (2016), que realizou um número maior de soldas, apesar de ter obtido uma pequena piora da estabilidade, após realizar o teste t , concluiu não haver diferença significativa entre os gases. Através dos resultados obtidos neste trabalho com a V_{alim} de 4,6 m/min, nota-se uma tendência em melhorar a estabilidade do arco com a adição de 1,5% de H_2 no $Ar+25\%CO_2$, sugerindo então que este é um teor mais adequado para a adição deste gás.

4.2.6.3 Comparação entre as soldas realizadas nas juntas e na chapa

Com base na Tabela 4.9 e nos valores destacados da Tabela 4.2, gerou-se os gráficos da Figura 4.21 que mostram a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e Ivcc para as soldas realizadas nas juntas e sobre a chapa com as atmosferas de proteção de CO_2 , $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$ com V_{alim} de 3,0 m/min.

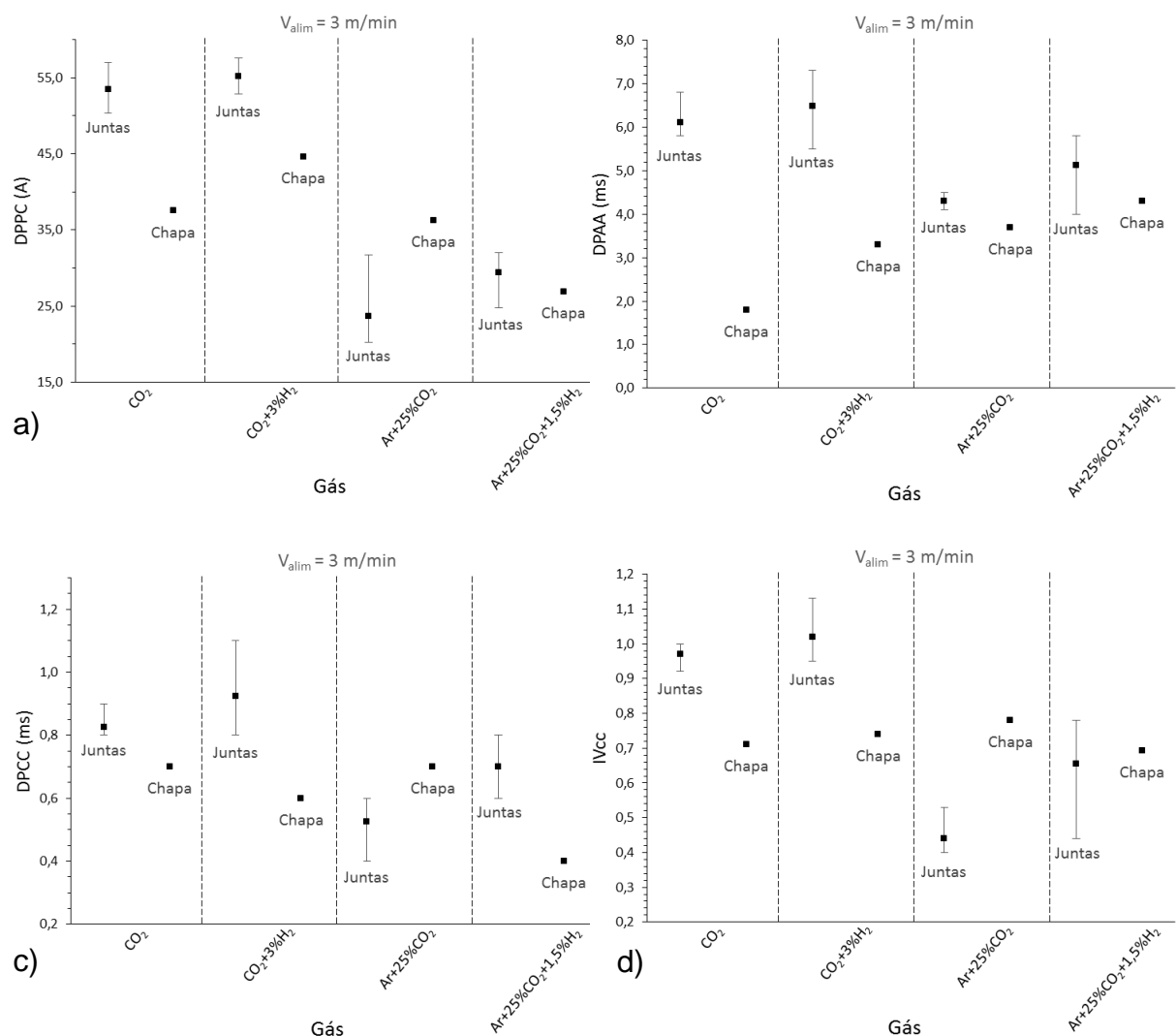


Figura 4.21: Variação dos índices de estabilidade de acordo com o local de realização das soldas (juntas T e V ou sobre a chapa) e a atmosferas de proteção com $V_{\text{alim}} = 3,0$ m/min: a) DPPC; b) DPAA; c) DPCC; d) Ivcc.

Analisando a Figura 4.21 foi observado que:

- Para os gases CO_2 e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$, as soldas realizadas em juntas apresentaram uma tendência em piorar a estabilidade do arco elétrico quando

comparadas à deposição do cordão sobre a chapa. Apresentando valores fora das faixas de bom comportamento operacional do processo definidas na primeira etapa (item 4.1.3). Este resultado sugere que as soldas realizadas com o CO_2 e o $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ a uma V_{alim} de 3,0 m/min apresentam uma estabilidade sensível a variações no processo, como alterar a execução do cordão sobre a chapa para juntas. Além disso, no caso do CO_2 , o valor de tensão correspondente ao mínimo dos índices (máximo de estabilidade), definido na primeira etapa, não é o valor central da faixa de estabilidade. Portanto, é possível que variações no processo podem mover os índices para fora da faixa de estabilidade com mais facilidade do que se o valor de tensão fosse central, ocorrendo uma maior aceitabilidade às variações neste caso.

- As soldas executadas nas juntas com o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ apresentaram os valores dos índices DPPC, DPCC e IV_{cc} menores que na deposição sobre a chapa. Já o DPAA apresentou valores ligeiramente superiores, entretanto ainda dentro da faixa de estabilidade do processo. Dessa forma, verifica-se que para o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ a estabilidade do arco elétrico foi superior nas juntas que no cordão efetuado sobre a chapa.

- O cordão depositado sobre a chapa com o gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$ apresentou o DPPC, DPAA e IV_{CC} contidos na variação destes índices para as soldas realizadas nas juntas. Já o DPPC foi levemente superior, contudo ainda dentro da faixa de bom comportamento operacional. Sendo assim, não foram identificadas alterações significativas ao comparar as soldas realizadas em juntas com o cordão depositado sobre a chapa para o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.

- As alterações observadas ocorreram, pois, o melhor parâmetro de soldagem para a deposição do cordão de solda sobre a chapa pode não ser o mesmo para a soldagem nas juntas, devido à sensibilidade característica do processo GMAW.

Com base na Tabela 4.10 e nos valores destacados da Tabela 4.2, gerou-se os gráficos da Figura 4.22 que mostram a variação dos índices de estabilidade DPPC, DPAA, DPCC e IV_{cc} para as soldas realizadas nas juntas e sobre a chapa com as atmosferas de proteção de CO_2 , $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$ com V_{alim} de 4,6 m/min.

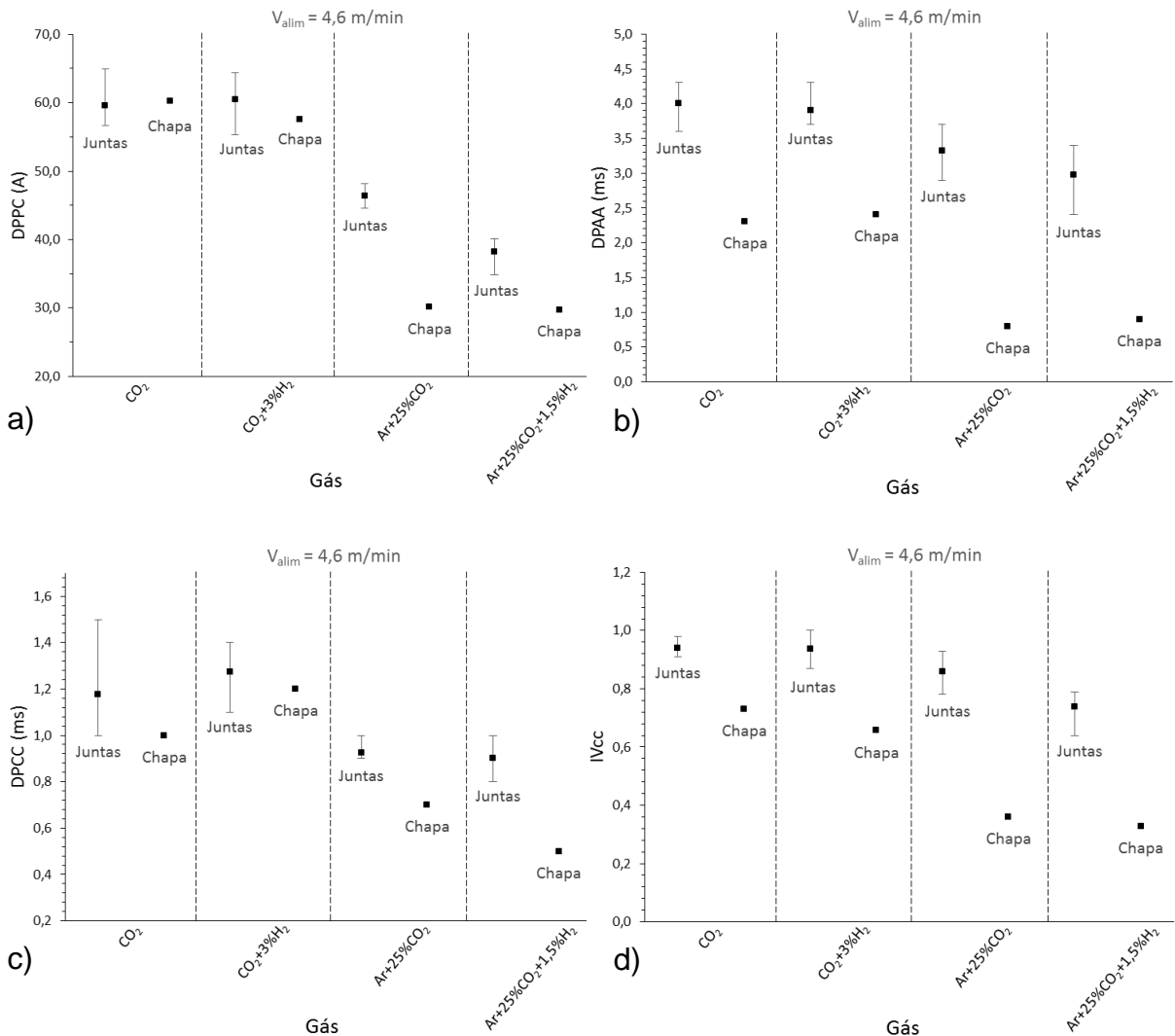


Figura 4.22: Variação dos índices de estabilidade de acordo com o local de realização das soldas (juntas T e V ou sobre a chapa) e a atmosferas de proteção com $V_{alim} = 4,6$ m/min: a) DPPC; b) DPAA; c) DPCC; d) Ivcc.

Analisando a Figura 4.22 foi observado que:

- Os cordões depositados sobre a chapa com os gases CO_2 e $CO_2+3\%H_2$ apresentaram o DPPC e o DPCC contidos na variação destes índices para as soldas realizadas nas juntas. Já o DPAA e o Ivcc foram levemente superiores, entretanto ainda dentro da faixa de estabilidade do processo definida na primeira etapa (item 4.1.3). Este resultado sugere que as soldas realizadas com o CO_2 e o $CO_2+3\%H_2$ a uma V_{alim} de 4,6 m/min apresentam uma estabilidade menos sensível às variações no processo do que com V_{alim} de 3,0 m/min. Além disso, para ambos os gases, o valor de tensão com maior estabilidade, definido na primeira etapa, encontra-se no centro da faixa de estabilidade. Portanto, acredita-se que variações no processo não movem

os índices para fora da faixa de estabilidade com facilidade, ou seja, ocorre uma maior aceitabilidade às variações.

- As soldas executadas nas juntas com o Ar+25%CO₂ e o Ar+25%CO₂+1,5%H₂ apresentaram a estabilidade do arco elétrico ligeiramente inferior que na deposição do cordão sobre a chapa, entretanto ainda na faixa de bom comportamento operacional. Este resultado sugere que as soldas realizadas com estes gases a uma V_{alim} de 4,6 m/min são mais sensíveis às variações no processo do que com V_{alim} de 3,0 m/min.

- Assim como para a V_{alim} de 3,0 m/min, o melhor parâmetro de soldagem para a deposição do cordão de solda sobre a chapa pode não ser o mesmo para a soldagem nas juntas, devido à sensibilidade característica do processo GMAW.

4.2.7 Avaliação da geometria do cordão de solda

a) Juntas “V”

A Figura 4.23 apresenta macrografias de soldas realizadas em corpos de prova com chanfro “V” e V_{alim} de 4,6 m/min nas atmosferas de proteção de CO₂ puro, CO₂+3%H₂, Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+1,5%H₂. A Tabela 4.11 apresenta a penetração da raiz (P), a tensão regulada na fonte de soldagem (U), a tensão média registrada no SAP (U_m) e a corrente média registrada no SAP (I_m). Realizou-se apenas a medida da penetração, pois o cordão de solda foi executado em passe único na raiz da junta. Sendo assim, não houve o preenchimento total da mesma, o que impossibilitou o dimensionamento da largura e reforço do cordão.

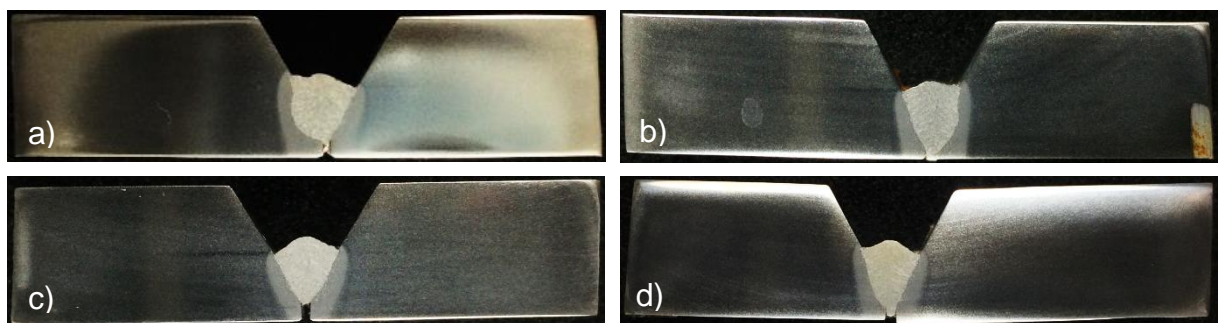


Figura 4.23: Macrografia dos corpos de prova: a) 14VB; b) 24VB; c) 34VB; d) 44VA.

Tabela 4.11: Penetração da raiz e dados elétricos dos corpos de prova com as macrografias analisadas.

CP	P (mm)	U (V)	U _m (V)	I _m (A)
14VB	1,11	20	20,3	185,2
24VB	1,78	20	19,8	187,7
34VB	0,71	17	17,3	198,2
44VA	1,47	17	16,9	197,9

Para facilitar o dimensionamento das macrografias, foram utilizados os corpos de prova soldados com V_{alim} de 4,6 m/min, pois estes apresentaram maior geometria do cordão de solda, o que está de acordo com a literatura (Bracarense, 2014; Modenesi, 2012; Nouri et al., 2007). Isso ocorre pois, conforme mostrado na Figura 2.20, a corrente de soldagem varia de acordo a V_{alim} , e conforme se aumenta a corrente é observado um aumento da penetração, largura e reforço do cordão. Além disso, foram utilizadas as juntas com o menor diferencial entre a corrente média registrada no SAP dos gases convencionais e sua respectiva mistura contendo H_2 , minimizando assim a possibilidade de o efeito da corrente se sobrepor ao do H_2 .

As juntas foram projetadas de forma que a penetração fosse parcial, permitindo então uma melhor avaliação do efeito do gás de proteção na penetração da junta. Sendo assim, com exceção da falta de penetração característica do projeto da junta, as macrografias das soldas não apresentaram descontinuidades. Essa ausência de descontinuidades internas, em conjunto com os resultados obtidos com a inspeção visual e por líquido penetrante (item 4.2.3), comprovam que é possível soldar juntas “V” de aço carbono com o processo GMAW realizando a adição de 1,5% de H_2 no $Ar+25\%CO_2$ e de 3% de H_2 no CO_2 .

Houve um aumento na penetração da raiz da junta quando se compara o CP soldado com $CO_2+3\%H_2$ com o CO_2 . Este comportamento também foi observado ao comparar o CP soldado com $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ com o $Ar+25\%CO_2$. Estes resultados indicam que a adição de H_2 nos gases de proteção convencionais aumenta a penetração, o que está de acordo com Menezes (2016) e Tatagiba (2015). Entretanto, segundo este último autor, o aumento da penetração foi principalmente devido ao efeito da corrente e tensão, porém com indícios de que a adição de H_2 teve influência. Diferentemente deste trabalho em que, conforme pode ser observado na Tabela 4.11, as correntes médias dos gases convencionais e suas misturas contendo H_2 estão muito próximas, sendo levemente superior para o $CO_2+3\%H_2$ e ligeiramente

inferior para o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$, portanto associa-se o resultado à adição de H_2 . Segundo Schwedersky et al. (2011) a adição de H_2 ao argônio no processo GTAW aumenta a eficiência de fusão para uma mesma corrente média, o que segundo Hoojimans (1994) é consequência da contração da coluna do arco e aumento da condutividade térmica da mistura de proteção ao adicionar o H_2 .

b) Juntas “T”

A Figura 4.24 apresenta macrografias de soldas de filete realizadas em corpos de prova com junta “T” e V_{alim} de 4,6 m/min nas atmosferas de proteção de CO_2 puro, $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$. A Tabela 4.12 apresenta as dimensões da garganta efetiva (G_e), da perna horizontal (P_h), da perna vertical (P_v) e da convexidade (C), além da tensão regulada na fonte de soldagem (U), da tensão média registrada no SAP (U_m) e da corrente média registrada no SAP (I_m).

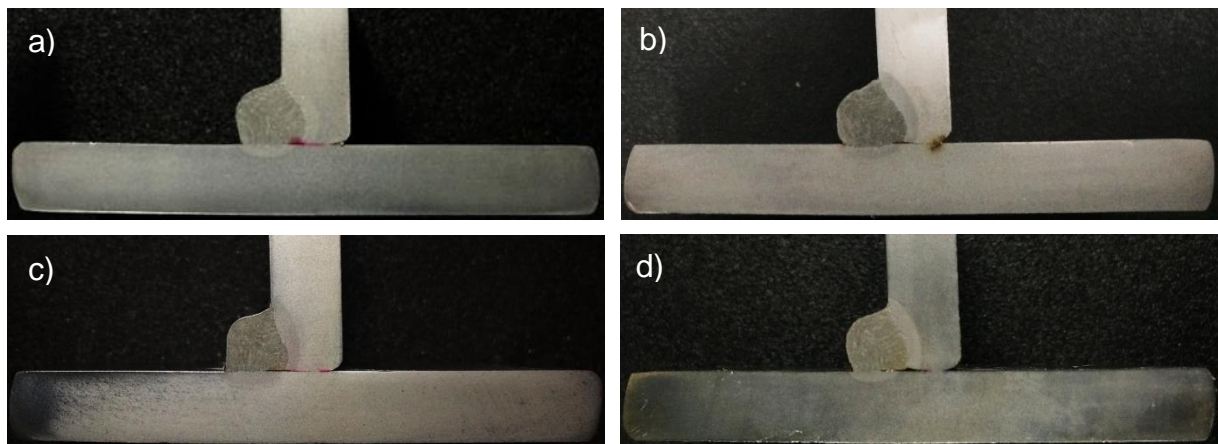


Figura 4.24: Macrografia dos corpos de prova: a) 14TB; b) 24TA; c) 34TA; d) 44TA.

Tabela 4.12: Dimensões e dados elétricos dos corpos de prova com as macrografias analisadas.

CP	G_e (mm)	P_h (mm)	P_v (mm)	C (mm)	U (V)	U_m (V)	I_m (A)
14TB	4,18	3,40	5,80	2,03	20	19,2	181,8
24TA	4,49	3,35	5,67	1,90	20	19,9	180,2
34TA	4,06	3,98	5,75	1,71	17	17,5	195,4
44TA	4,01	3,32	6,04	1,93	17	16,9	187,8

Foram utilizadas as juntas de topo soldadas com V_{alim} de 4,6 m/min, assim como da junta “V”, pois estas apresentaram maior geometria do cordão de solda,

facilitando assim o dimensionamento da macrografia. Foram selecionadas, novamente, as juntas com a menor diferença de corrente média registrada no SAP entre os gases convencionais e sua respectiva mistura contendo H_2 , minimizando assim a possibilidade de o efeito da corrente se sobrepor ao do H_2 .

Não foram detectadas trincas ou poros na secção interna dos cordões de solda. A ausência destes em conjunto com os resultados obtidos com a inspeção visual e por líquido penetrante (item 4.2.3) comprovam que é possível soldar juntas “T” de aço carbono com o processo GMAW realizando a adição de 1,5% de H_2 no $Ar+25\%CO_2$ e de 3% de H_2 no CO_2 . Entretanto, foi identificada falta de fusão em todos os corpos de prova (Figura 4.24). Associa-se esta descontinuidade ao posicionamento da junta em relação a tocha no momento da soldagem, pois, conforme mostrado pela Tabela 4.12, a dimensão da perna horizontal é menor do que a vertical em todos as juntas. Isso sugere que a tocha não estava posicionada de forma equidistante das duas chapas, estando mais próxima da chapa vertical do que da horizontal. Sendo assim, houve maior fusão da chapa vertical do que da horizontal, gerando falta de fusão nesta última.

Foi observado um leve aumento na garganta efetiva em conjunto com uma ligeira redução das penas e convexidade ao se comparar o CP soldado com $CO_2+3\%H_2$ com o CO_2 . Estes resultados são associados a contração da coluna do arco e aumento da condutividade térmica da mistura de proteção devido a adição de H_2 (Hooijmans, 1994).

Ao comparar o CP soldado com $Ar+25\%CO_2+1,5\%H_2$ (44TA) com o $Ar+25\%CO_2$ (34TA), foi verificada uma redução da perna horizontal, entretanto a perna vertical aumentou (Tabela 4.12). Associa-se este resultado a um posicionamento diferente da tocha em relação ao corpo de prova, estando mais próximo a chapa vertical no CP 44TA do que no 34TA. Também foi observado que ocorreu um aumento na convexidade e que a garganta efetiva foi similar em ambos os casos. Porém, ao comparar a corrente média durante a soldagem desses corpos de prova, foi verificado que o CP 44TA apresentou um valor menor que o 33TA, o que sugere que a adição do H_2 manteve a garganta efetiva mesmo com uma corrente de soldagem inferior.

4.2.8 Considerações da segunda etapa

- A quantidade de respingos, escória e fumos gerados nas soldas com os gases CO_2 e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ foram maiores que com os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.
- A adição de 1,5% de H_2 no $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ gerou uma redução de 0,299 g/min (18%) na taxa de respingos. Entretanto, a adição de 3% de H_2 no CO_2 não gerou alteração significativa em relação à taxa de respingos, apresentando o gás o $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ uma taxa de 0,082 g/min (4%) maior que o CO_2 puro.
- A taxa de deposição das soldas realizadas com os gases contendo H_2 foi superior à dos respectivos gases convencionais. Esse aumento pode estar relacionado à maior condutividade térmica do H_2 e as suas reações de dissociação e associação em diferentes regiões do arco.
- Não foram verificadas alterações na estabilidade do arco elétrico em função do tipo de junta que foi soldada (“T” e “V”).
- A adição de 3% de H_2 no CO_2 e de 1,5% de H_2 no $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ em soldas realizadas com V_{alim} de 4,6 m/min produziu soldas com estabilidade do arco elétrico igual ou superior ao dos gases comerciais. Entretanto, com a V_{alim} de 3,0 m/min a estabilidade foi igual ou inferior.
- A avaliação da estabilidade do arco elétrico sugere que os gases com adições de H_2 possuem um melhor comportamento operacional em faixas de corrente/ V_{alim} e tensão mais elevadas.
- A adição de 3% e de 1,5% de H_2 nos gases CO_2 e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, respectivamente, aumentou a penetração da solda na raiz da junta “V”.
- Foi obtido um ligeiro aumento na garganta efetiva da junta “T” com a adição de 3% de H_2 no CO_2 . Apesar de não ter sido identificado aumento na garganta efetiva com a adição de 1,5% de H_2 no $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, a análise dos resultados sugere que, devido a

adição de H₂, a garganta efetiva foi mantida mesmo com uma corrente de soldagem ligeiramente inferior.

4.3 Terceira etapa

O objetivo desta etapa foi avaliar a influência da adição de 3 e 1,5% de H₂ nos gases comerciais CO₂ e Ar+25%CO₂, respectivamente, em relação a microestrutura e dureza do metal de solda.

4.3.1 Caracterização microestrutural

A Figura 4.25 apresenta uma micrografia panorâmica, onde é observada a variação microestrutural na junta soldada desde o metal base até a zona fundida.

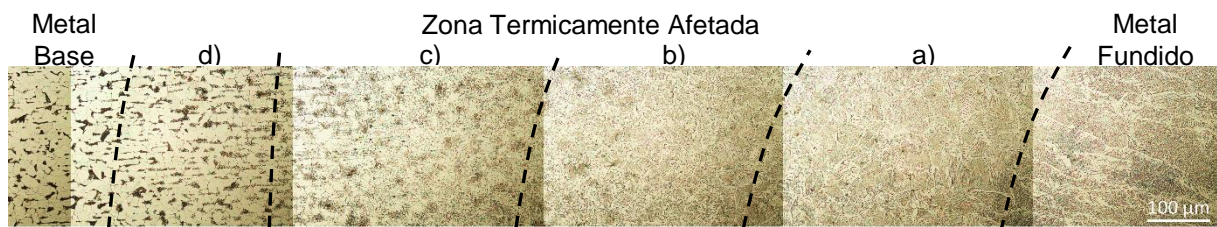


Figura 4.25: Micrografia panorâmica mostrando a variação da microestrutura. A ZTA está dividida em: a) região de granulação grosseira; b) região de normalização; c) região intercrítica; d) região subcrítica.

Aumento de 200X.

Foi identificada a interface da zona fundida com a zona termicamente afetada (ZTA) e adjacente a ela encontra-se as diferentes regiões que constituem a ZTA, são elas: zona de região de granulação grosseira, região de normalização, região intercrítica e região subcrítica. Uma transição suave da região subcrítica para o metal base é observada, não havendo uma alteração microestrutural brusca como a observada da ZTA para a zona fundida. Também foi verificado que a microestrutura da zona fundida aparenta ter se desenvolvido a partir dos contornos de grão da ZTA adjacente durante o processo de solidificação, como sugerido através da continuidade observada entre os contornos de grão grosseiros da ZTA e os grãos colunares da ZF, o que está de acordo com Modenesi, Marques e Santos (2012).

A Figura 4.26 apresenta a microestrutura do metal de solda de corpos de prova soldados com CO_2 , $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.

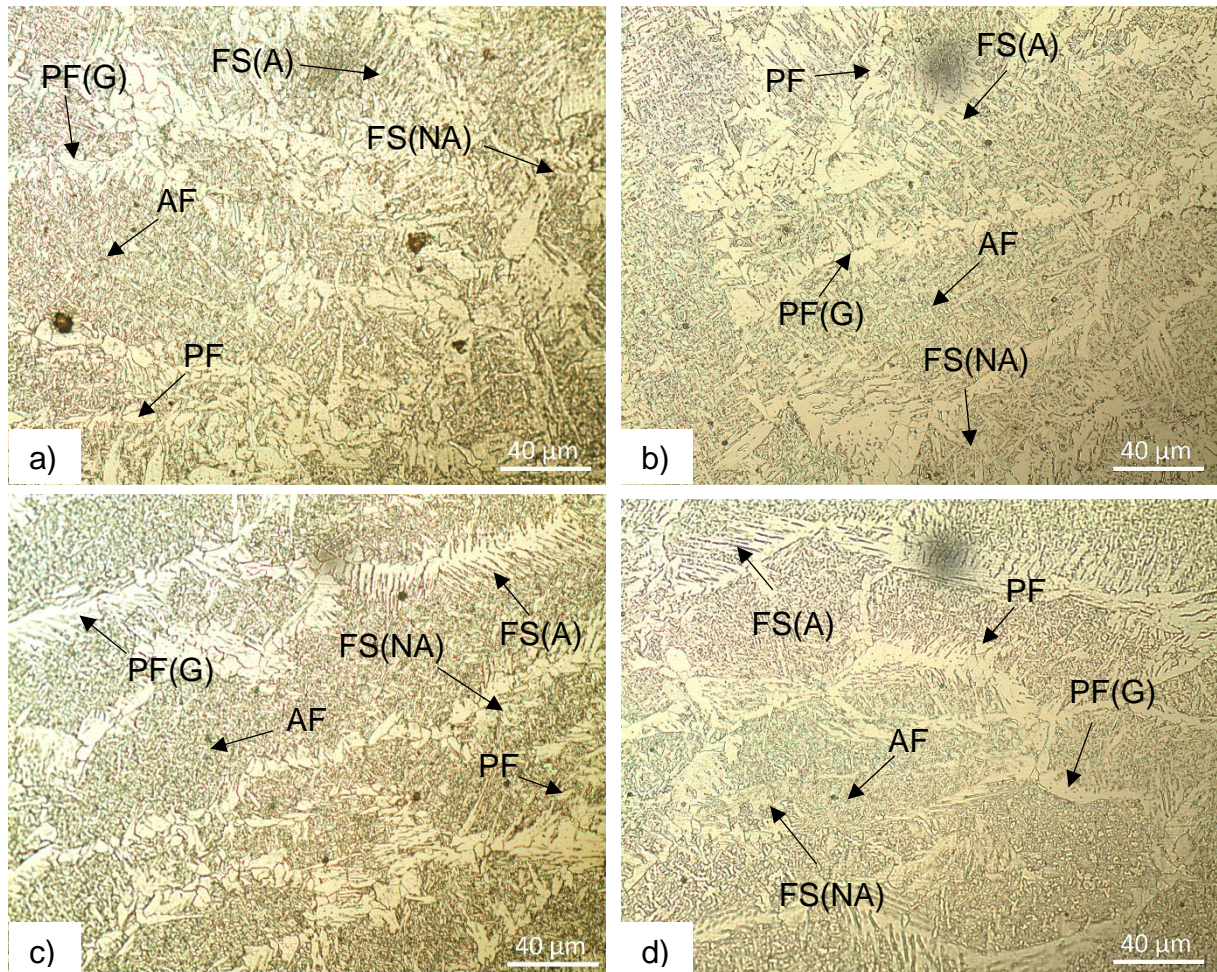


Figura 4.26: Micrografias do metal fundido: a) CO_2 ; b) $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$; c) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$; d) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.

Aumento de 500X.

As morfologias identificadas nas soldas para os diferentes gases de proteção são similares, apresentando os mesmos constituintes microestruturais. Foi observada uma microestrutura moderadamente refinada composta majoritariamente de ferrita acicular – AF, ferrita primária – PF e ferrita de contorno de grão – PF(G). Foi identificada também a presença, em menor quantidade, de ferrita com segunda fase alinhada – FS(A) e não alinhada – FS(NA). Não foi verificada a presença de martensita – M, que segundo Modenesi (2004) é o constituinte microestrutural com maior sensibilidade à fissuração pelo hidrogênio devido a sua elevada dureza e menor ductilidade. Também não foi identificada a presença de agregado ferrita-carbeto – FC. As microestruturas observadas são características do metal de solda de aços ferríticos

(Perdigão, 1987), estando de acordo com os resultados de Tatagiba (2015), Menezes (2016) e Ribeiro (2016).

Não foram identificadas, qualitativamente, diferenças significativas na composição microestrutural do metal de solda obtido com os gases CO_2 e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$. Este comportamento também foi observado ao analisar o metal de solda gerado com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.

Ao comparar a microestrutura da ZF das soldas realizadas com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$ com a obtida com o CO_2 e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$, foi observado um aumento da quantidade AF e uma redução da quantidade de PF, o que está de acordo com Ebrahimnia et al. (2009). Este resultado é associado a quantidade de Mn e Si presente no metal de solda. Como o metal de adição utilizado durante os experimentos foi o ER70S-6, que possui uma elevada combinação de Mn e Si (elementos desoxidantes), ao reduzir o potencial de oxidação do gás de proteção, ou seja, diminuir a quantidade de CO_2 , estes elementos vão para o cordão de solda e aumentam a temperabilidade do mesmo. Dessa forma, ocorre uma tendência em diminuir a quantidade de PF e aumentar a quantidade de AF (Modenesi, 2004; Kou, 2003).

Outro fator que pode ter colaborado para os gases com maior percentual de CO_2 possuir uma menor quantidade de AF é a variação na taxa de resfriamento da solda. Com o maior teor de CO_2 na atmosfera de proteção, a temperatura do arco também aumenta, assim como a quantidade de calor na poça de fusão. Sendo assim, a taxa de resfriamento diminui, o que propicia a formação dos constituintes da microestrutura que se formam primeiro (temperaturas mais elevadas) e dificulta a formação dos constituintes que se formam posteriormente (temperaturas mais baixas), que é o caso da AF (Modenesi, 2004; Kou, 2003). A Figura 2.8 apresenta um diagrama de TRC da zona fundida onde é possível observar a influência da velocidade de resfriamento na formação da microestrutura.

4.3.2 Dureza Vickers

A Tabela 4.13 apresenta os valores de dureza Vickers (HV) obtidos no metal de base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF) para os gases de proteção CO_2 , $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$, $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$.

Tabela 4.13: Valores de dureza Vickers do MB, ZTA e ZF em soldas obtidas com as atmosferas de CO₂, CO₂+3%H₂, Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+1,5%H₂.

Medição	Região	Dureza (HV)			
		CO ₂	CO ₂ +3%H ₂	Ar+25%CO ₂	Ar+25%CO ₂ +1,5%H ₂
1	MB	129	138	128	124
2		131	133	130	130
3		133	133	139	137
4	ZTA	177	178	187	177
5		201	190	198	202
6		219	196	207	205
7	ZF	229	219	247	245
8		224	220	254	250
9		234	225	248	244
10		230	223	246	231
11		231	224	247	227
12		225	224	242	244
13	ZTA	200	196	211	196
14		185	200	192	189
15		181	176	172	183
16	MB	132	136	129	134
17		134	127	131	130
18		133	125	130	124
Média MB		132	132	131	130
Desvio padrão MB		2	5	4	5
Média ZTA		194	189	195	192
Desvio Padrão ZTA		16	10	14	11
Média ZF		229	223	247	240
Desvio Padrão ZF		4	2	4	9

Os valores de dureza Vickers obtidos no MB foram bem próximos para os quatro gases de proteção. Este comportamento era esperado pelo fato de que esta região é mais afastada da solda e não sofre influência em suas propriedades devido ao ciclo térmico gerado pela soldagem, pois sua temperatura de pico é inferior à sua temperatura crítica (Modenesi, Marques e Santos, 2012).

A ZTA não apresentou alterações significativas de dureza Vickers de acordo com o gás de proteção, entretanto apresentou maior variação dos resultados, que é associada às distintas regiões presentes na ZTA. Apesar da maior variação, os valores obtidos estão bem abaixo de 325 HV, que segundo Modenesi (2004) indica uma elevada susceptibilidade à fissuração pelo H₂.

Já na região da ZF, foi identificada uma variação das médias de dureza Vickers em função do gás de proteção utilizado, sendo melhor avaliada pelo gráfico da Figura 4.27. Verifica-se que a ZF da junta soldada com CO₂ apresentou uma média de 229

HV, sendo ligeiramente superior à média de 223 obtida na soldagem com o $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$. Os valores de dureza encontrados nos gases com maior teor de CO_2 são moderadamente inferiores aos encontrados para os gases com menor teor de CO_2 . A junta soldada com o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ apresentou uma média de 247 HV, que é ligeiramente superior à encontrada para o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$, que foi de 240 HV.

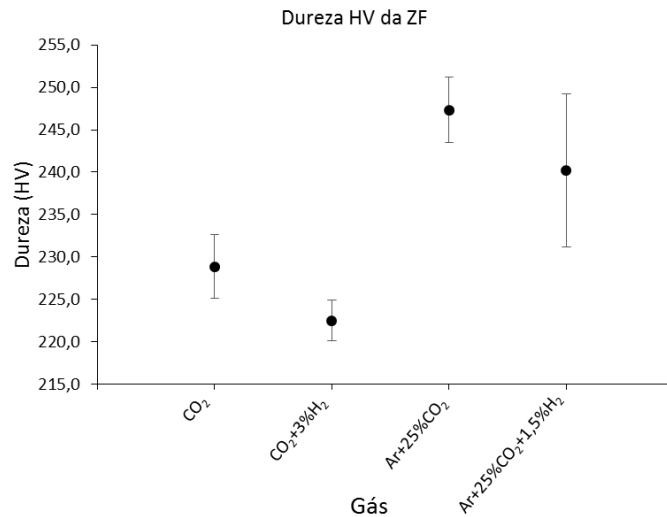


Figura 4.27: Variação da dureza Vickers em função do gás de proteção utilizado.

Foi verificado um pequeno aumento no valor de dureza da ZF ao se utilizar os gases com menor teor de CO_2 , o que está de acordo com Ebrahimnia et al. (2009). Este resultado foi atribuído a provável maior quantidade de Mn e Si no metal de solda dos CPs soldados com o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$ em relação ao CO_2 e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$ (conforme discutido no item 4.3.1), que gera uma maior quantidade do constituinte AF na microestrutura da ZF e conseqüentemente tende a aumentar o seu valor de dureza.

Além disso, foi observada uma ligeira tendência em reduzir o valor de dureza da ZF ao adicionar 3 e 1,5% de H_2 nos gases convencionais CO_2 e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, respectivamente. Este resultado foi atribuído a taxa de resfriamento mais alta nas soldas realizadas com os gases convencionais em relação a sua respectiva mistura contendo H_2 . O fato do H_2 possuir uma condutividade térmica elevada, conforme mostrado pela Figura 2.5, aumenta a quantidade de calor transferida pelo arco elétrico para a região da solda durante a soldagem e conseqüentemente torna o tempo de resfriamento mais longo (Gülenç et al., 2005).

4.3.3 Considerações da terceira etapa

- Foi observada uma variação da microestrutura, característica da soldagem, em função da proximidade com o metal de solda. Foram identificadas as interfaces entre o metal base, a zona termicamente afetada e suas regiões e o metal fundido.
- As morfologias identificadas na ZF foram similares para todos os gases de proteção, apresentando AF, PF, PF(G), FS(A), FS(NA).
- Os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$ apresentaram um aumento da quantidade AF e uma redução da quantidade de PF na ZF em relação ao CO_2 e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$.
- Os gases com menor teor de CO_2 apresentaram um pequeno aumento na dureza Vickers da ZF.
- A adição de 3 e 1,5% de H_2 nos gases comerciais CO_2 e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, respectivamente, não gerou alterações significativas na microestrutura da ZF.
- Foi observada uma ligeira tendência em reduzir a dureza da ZF ao adicionar 3% de H_2 no CO_2 e 1,5% de H_2 no $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

No presente trabalho, onde foi avaliado o efeito da adição de e 1,5% de H₂ no Ar+25%CO₂ e de 3% de H₂ no CO₂ na soldagem GMAW de aço baixo carbono em juntas de topo com chanfro “V” e juntas “T”, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A adição de H₂, nos teores utilizados, nos gases convencionais produziu cordões de solda com bom aspecto visual, geometria adequada e, em sua maioria, isentos de descontinuidades.
- De acordo com a V_{alim} /corrente e o gás utilizado, foram identificadas, qualitativa e quantitativamente, faixas de tensões com boa estabilidade do processo. Ao utilizar tensões abaixo ou acima desta faixa, as soldas apresentaram instabilidades.
- A adição de 1,5% de H₂ no Ar+25%CO₂ ocasionou uma redução da taxa de respingos. No entanto, a adição de 3% de H₂ no CO₂ não alterou significativamente a taxa de respingos.
- A taxa de deposição dos gases contendo H₂ foi superior aos respectivos gases convencionais.
- A estabilidade do arco elétrico foi similar para as soldas realizadas em juntas de topo com chanfro “V” na posição plana e as soldas de filete em juntas “T” na posição horizontal.
- A avaliação da estabilidade do arco elétrico sugere que os gases com adições de H₂ possuem um melhor comportamento operacional em faixas de corrente/ V_{alim} e tensão mais elevadas, apresentando com V_{alim} de 4,6 m/min estabilidade do arco elétrico igual ou superior à dos gases convencionais.
- A adição de H₂ tende a aumentar a penetração na raiz das soldas realizadas na junta “V” e a garganta efetiva nas soldas realizadas na junta “T”.

- Os gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+1,5\%\text{H}_2$ apresentaram um aumento da quantidade de AF e uma redução de PF na ZF em relação ao CO_2 e $\text{CO}_2+3\%\text{H}_2$.
- A adição de H_2 nos gases convencionais gerou uma pequena redução na dureza Vickers da ZF. Os gases com menor teor de CO_2 exibiram valores moderadamente mais elevados.

CAPÍTULO 6: SUGESTÕES

Para as pesquisas à serem realizadas futuramente, as sugestões são:

- Realizar as soldas em uma faixa mais elevada de corrente/ V_{alim} e tensão.
- Aumentar a velocidade de soldagem para os gases contendo H_2 em relação aos respectivos gases convencionais para encontrar a relação em que a geometria dos cordões é semelhante.
- Investigar se a variação da vazão do gás de proteção provocará alterações nos resultados obtidos.
- Calcular a relação entre produtividade e custos de soldagem para cada gás e analisar a viabilidade econômica da aplicação das misturas contendo H_2 no mercado.
- Medir o tamanho dos respingos coletados.
- Analisar quantitativamente a geração de fumos durante a soldagem.
- Aplicar uma metodologia para medir a quantidade de escória gerada.
- Estudar o efeito da adição do H_2 nos gases convencionais na soldagem GMAW com transferência metálica por spray.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI (2011). PR-050 – Ensaio Visual e Dimensional de Soldas: Procedimento de END. rev. 2.

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

Amson, J. C. (1965). Lorentz force in the molten tip of an arc electrode. *British Journal of Applied Physics*, v. 16, n. 8, p. 1169-1179.

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

AWS (2000). D1.1. Structural Welding Code-Steel. American Welding Society. 17. ed. Miami, Florida.

AWS (2005). A5.18/A5.18M. Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding. American Welding Society. Miami, Florida.

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

AWS (2001). Welding Handbook: Welding Science and Technology. American Welding Society, v.1, 9. ed. Miami, FL.

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

Baixo, C.E.I. (1999). Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Baixo, C.E.I., Dutra, J.C. (1989). O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG através de projetor e de Tratamentos Oscilográficos de Tensão e Corrente. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, São Paulo - SP. p. 193-209.

Bracarense, A. Q. (2014). Gas Metal Arc Welding. *Infosolda*, p. 01-27.

Camargo, L. G., Drechsler, M. F., Santos, C. M., Vieira, T. (2016). Proposta e Análise de Dispositivo para Otimização do Destacamento da Gota na Soldagem MIG/MAG. *Soldagem & Inspeção*, v. 21, n. 1, p. 83–91.

Carpenter, K. R., Monaghan, B. J., & Norrish, J. (2009). Analysis of fume formation rate and fume particle composition for gas metal arc welding (GMAW) of plain carbon steel using different shielding gas compositions. *ISIJ international*, v. 49, n. 3, p.416-420.

Cary, H. B., Scott C. H. (2005). *Modern Welding Technology*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education.

Cayo, E.H., Alfaro, S.C.A. (2012). Welding stability assessment in the GMAW-S process based on fuzzy logic by acoustic sensing from arc emissions. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, v. 55, n. 1, p. 18-25.

Coffin, C. L. (1890). Process of welding metals electrically. Patente US 428459, disponível em: <<https://www.google.com/patents/US428459>> Acesso em: 02 mar. 2017.

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

da Costa, A. V., Ponomarev, V., & Scotti, A. (2003). Desenvolvimento de uma metodologia para determinação de quedas de tensão em arcos com transferência em vôo livre. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia-MG.

Dutra, G. C., Baixo, C. E. I., Ollé, I. F., Gohr Júnior, R. (1995). Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem - ENTS, Caxias do Sul, p. 867-888.

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

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

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

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 & Design*, v. 30, n. 9, p. 3891-3895.

ESAB (2007). *Smashweld 316 & Smashweld 316 Topflex: Conjunto semiautomático para soldagem MIG/MAG - Manual de Instruções*. rev. 4.

Fernandes, D. B., de Menezes Júnior, L. C., Vilarinho, L. O., & Scotti, A. (2010). Ensaio para Medição de Nível e Alcance de Respingos em Soldagem MIG/MAG. *Soldagem & Inspeção*, v. 15, n. 2, p. 150-155.

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

Fortes, C., Vaz, C. (2005). *Soldagem MIG/MAG*. Apostila ESAB, São Paulo.

- Frauches-Santos, C., Albuquerque, M. A., Oliveira, M. C., & Echevarria, A. (2013). A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos. *Revista Virtual de Química*, v. 6 , n. 2, p. 293-309.
- Garcia, R. P., Scott, A. (2011). Uma metodologia para análises comparativas da capacidade produtiva entre arames maciços (MIG/MAG) e tubulares (eletrodo tubular). *Soldagem & Inspeção*, v. 16, n. 2, p. 146-155.
- Gentil, V. (1996). *Corrosão. Livros Técnicos e Científicos. Editora - LTC. 3 ed. Rio de Janeiro.*
- Gonçalves, R. H., Dutra, J. C., Gohr, R. (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 & Inspeção*, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 70-81.
- Groetelaars, P. J., Scotti, A. (2007). Influência do teor de CO₂ no gás de proteção sobre a transferência metálica no processo MIG/MAG duplo-aramé. *Soldagem & Inspeção*, v.2, n.1, p. 29-37.
- Gülenç, 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*, v. 30, n. 13, p.1475-1481.
- Hashmi, S. (2014). *Comprehensive materials processing, Welding and Bonding Technologies*, v. 6, Elsevier.
- Heald, P. R. Heald, P. R., Madigan, R. B., Siewert, T., & Liu, S. (1994). Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER100S-1 GMAW Electrode. *Welding Journal*, v. 73, n. 2, p. 38s-44s.
- Hermans, M. J. M., Den Ouden, G. (1999). Process behavior and stability in short Circuit Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal. Welding Research Supplement*, v. 78, n. 4, p. 137-141.
- Hooijmans, J. W. (1994). Hydrogen absorption in iron and steel during gas tungsten arc welding. Doctoral thesis, Delft University of Technology.
- IMC Soldagem (2005). *SAP-V4.01 – Manual do Sistema*. Florianópolis-SC.
- IMC Soldagem (2014). *SAP-V4 + V4Ti + V4CTi – Manual do Sistema*. 4 ed. Palhoça-SC.
- Irving, B. (1999). Shielding gases are the key to innovations in welding. *Welding Journal*, v. 78, n. 1, p. 37-41.
- ISO 6507-1 (2018). *Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method*.

- Jardim, W. F., Canela, M. C. (2004). Fundamentos da oxidação química no tratamento de efluentes e remediação de solos. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, v. 1, Campinas.
- Jonsson, P. G., Murphy, A. B., Szekely, J. (1995). The influence of oxygen additions on argon-shielded gas metal arc welding processes. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, v. 74, n. 2, p. 48s-58s.
- Kah, P., Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 64, n. 9-12, p. 1411-1421.
- Kang, M. J., Kim, Y., Ahn, S., & Rhee, S. (2003). Spatter rate estimation in the short circuit transfer region of GMAW. *Welding Journal*, v. 82, n.9, p. 238-247.
- Kang, M. J., Rhee, S. (2001). A Study on the Development of the Arc Stability Index Using Multiple Regression Analysis in the Short-Circuit Transfer Region of Gas Metal Arc Welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 215, n. 2, p. 195-205.
- Khalaf, P.I., Souza, I.G., Carasek, E., Debacher, N.A. (2011). Produção de Gás de Síntese por Plasma Térmico via Pirólise de Metano e Dióxido de Carbono. *Revista Química Nova*, v. 34, n. 9, p. 1491-1495.
- Kim Y-S. Eagar T. W. (1993). Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*, v. 72 n. 1, p. 269-278.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. 2. ed. Jhon Willey & Sons, New York.
- Lancaster, J.F. (1984). The Physics of Welding. *Physics in Technology*, v.15, n. 2, p. 73-79.
- Lin, Z. H. A. O., Tian, Z. L., Yun, P. E. N. G., Qi, Y. C., Wang, Y. J. (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*, v. 14, n. 5, p. 259-262.
- Lincoln, J. F. (2000). *The procedure handbook of arc welding*. 14. ed. The Lincoln Electric Company. Cleveland, Ohio.
- Liskevych, O., Scotti, A. (2015). Influence of the CO₂ content on operational performance of short-circuit GMAW. *Welding in the World*, v. 59, n. 2, p. 217-224.
- Liskevych, O., Scotti, A. (2010). Adaptação do Cálculo da Frequência de Destacamento das Gotas para Índice de Regularidade da transferência Metálica em MIG/MAG por Curto-Circuito. In: 20º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia.
- Machado, I.G. (1996). *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Editado pelo autor, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 477 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, v. 24. Fortaleza: Associação Brasileira de Soldagem.
- Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q. (2009). Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 363 p.
- Meneses, V. A, Gomes, J. F. P, Scotti, A. (2014). The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 7, p.1388-1397.
- Menezes, T. P. (2016). Estudo da Adição de Hidrogênio em Gases de Proteção Convencionais na Soldagem GMAW de Aço Baixo Carbono. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 93 p.
- Modenesi, P. J. (2004). Soldabilidade dos aços transformáveis. Belo Horizonte, MG: UFMG.
- Modenesi, P. J. (2005). Normas e Qualificação em Soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- Modenesi, P. J. (2012). Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. Belo Horizonte – MG. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Modenesi, P. J., & De Avelar, R. C. (1999). The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 86, n. 1, p. 226-232.
- Modenesi, P. J., Marques, P. V., & Santos, D. B. (2012). Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: UFMG.
- Modenesi, P.J., Nixon, J.H. (1994). Arc instability Phenomena in GMAW Welding. *Welding Journal Including Welding Research Supplement*, v. 73, n. 9, p. 219-224.
- Morales, R. F., Resende, A., Scotti, A. (2007). Influência da adição de hélio no gás de proteção sobre a geometria do cordão de solda MIG/MAG de aço ao carbono. In: IV Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Águas de São Pedro - São Paulo.
- Nadzam, J., Armao, F., Byall, L., Kotecki, D., & Miller, D. (2011). Gas Metal Arc Welding Guidelines. Lincoln electric.
- Nouri, M., Abdollah-Zadeh, A., Malek, F. (2007). Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding. *Journal of materials science & technology*, v. 23, n. 6, p. 817-822.
- Ogino, Y., Irata, Y. (2015). Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW. *Welding in the World*, v. 59, n. 4, p. 465-473.
- Padilha, A. F. (1997). Microestrutura e Propriedades. São Paulo: Hemus.

Perdigão, S. C. (1987). Instrução para Classificação dos Constituintes Microestruturais do Metal de Solda dos Aços Ferríticos, Utilizando-se Microscopia Ótica. ABS Associação Brasileira de Soldagem, 18p.

PETROBRAS (2003). N-1438 – Soldagem: Terminologia. rev. D.

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

Pires, J. N., Loureiro, A., & Bölmsjö, G. (2006). Welding robots: technology, system issues and application. Springer Science & Business Media.

Radaj, D. (2012). Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion. Springer-Verlag.

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

Rezende, G. M. C. D., Liskevych, O., Vilarinho, L. O., & Scotti, A. (2011). Um critério para determinar a regulação da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. Soldagem & Inspeção, v. 16, n. 2, p. 98-103.

Rhee, S., Kannatey-Asibu Jr, E. (1991). Analysis of arc pressure effect on metal transfer in gas-metal arc welding. Journal of applied physics, v. 70, n. 9, p. 5068-5075.

Ribeiro, R.B.G. (2016). Estudo do efeito da adição de gás combustível C₃H₆ nas atmosferas de proteção convencionais do processo GMAW. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 165 p.

Roca, S. A., Fals, H. C., Fernández, J. B., Adán, F. S. (2005). Application of U versus I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Transfer Mode. Soldagem & Inspeção, v. 10, n. 2, p. 85-91.

Roca, S. A., Fals, H. C., Fernández, J. B., Macías, E. J., Adán, F. S. (2007). New Stability Index for Short Circuit Transfer Mode in GMAW Process Using Acoustic Emission Signals. Science and Technology of Welding and Joining, v. 12, n. 5, p. 460-466.

SAE (2001). Chemical Compositions of SAE Carbon Steels – SAE J403. Society of Automotive Engineers.

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 & Inspeção, v. 16, n. 34, p. 333-340.

- Scotti, A. (2000). Mapping transfer modes for stainless steel gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 5, n. 4, p. 227-234.
- Scotti, A., Ponomarev, V. (2014). *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 288p.
- Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W. (2012). A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, n. 6, p. 1406-1413.
- Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W. (2014). Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 11, p. 2488-2496.
- Silva, R.H.G., Dutra, J.C., Gohr, R.Jr (2007). Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) - Uma Revisão da Literatura. Parte 1 de 3: Aspectos Históricos e dos Mecanismos de Fusão do Arame. *Soldagem & Inspeção*. v. 12, n. 3, p. 237-243.
- Simpson, S. W., Zhu, P. (1995). Formation of molten droplets at a consumable anode in an electric welding arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 28, n. 8, p. 1594-1600.
- Souza, D., Rossi, M. L., Keocheguerians, F., Nascimento, V. C., Vilarinho, L. O., Scotti, A., (2011). Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG-MAG Operando em Curto-Circuito. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 22-32.
- Stenbacka, N., Persson, K. A. (1989). *Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding*. *Welding Journal*, v. 68, n. 11, p. 41-47.
- Su, J. T. (2007). An electron force field for simulating large scale excited electron dynamics. PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Suban M, Tušek J, Uran M. (2001). Use of hydrogen in welding engineering in former times and today. *Journal of Materials Processing Technology*, v.119, n. 1, p. 193-198.
- Suban, M., Tušek, J. (2003). Methods for the determination of arc stability. *Journal of Materials Processing Technology* v. 143-144, n. 1, p. 430-437.
- Suban, M., Tušek, J. (2001). Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 119, n. 1, p. 185-192.
- Tatagiba, L. C. S., Gonçalves, R. B., Paranhos, R., (2012). Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG-MAG. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 17, n.3, p. 218-228.
- Tatagiba, L.C.S. (2015). *Formulação de Gases de Proteção com Adições de Gases Redutores para Soldagem MIG/MAG*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de

Materiais) Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 141 p.

Tušek, J., & Suban, M. (2000). Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 25, n. 4, p. 369-376.

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

Weglowski, M., Huang, Y., Zhang, Y.M. (2008). Effect of welding current on metal transfer in GMAW. *Archives of Materials Science and Engineering*, v. 33, n. 1, p. 49-56.

White Martins (2010). White Martins Praxair Inc: Gases Especiais e Equipamentos.

Zielinska, S., Pellerin, S., Valensi, F., Dzierzega, K., Musiol, K., De Izarra, C., & Briand, F. (2008). Gas influence on the arc shape in MIG-MAG welding. *The European Physical Journal-Applied Physics*, v. 43, n. 1, p. 111-122.