

ESTUDO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO EM GASES DE PROTEÇÃO
CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW DE AÇO DE BAIXO
CARBONO

THIAGO DE PAIVA MENEZES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
AGOSTO - 2016

ESTUDO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO EM GASES DE PROTEÇÃO
CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW DE AÇO DE BAIXO
CARBONO

THIAGO DE PAIVA MENEZES

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. Ph.D. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO – 2016

ESTUDO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO EM GASES DE PROTEÇÃO
CONVENCIONAIS NA SOLDAGEM GMAW DE AÇO DE BAIXO
CARBONO

THIAGO DE PAIVA MENEZES

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

Aprovada em 23 de agosto de 2016.

Comissão Examinadora:

Prof. Alan Monteiro Ramalho (D.Sc. Engenharia e Ciência dos Materiais) – IFF

Prof^a. Elaine Cristina Pereira e Oliveira (D.Sc. Engenharia e Ciência dos Materiais) – UENF

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

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

À minha amada sobrinha Letícia, às minhas queridas irmãs Thaís e Carmem Geanny e aos nossos incríveis pais Gilson e Rosemary.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar a oportunidade de aprender cada dia mais com os livros e com a vida.

Aos meus pais, Gilson e Rosemary, que sempre colocaram a educação dos seus filhos em primeiro lugar.

As minhas irmãs, Carmem Geanny e Thaís, e a minha sobrinha, Letícia, por terem sido a fonte de inspiração para encarar este desafio.

Ao meu orientador, Ronaldo Paranhos, por ter me dado a oportunidade de participar deste trabalho que tanto me engrandeceu profissionalmente.

Aos amigos Cátia Viana, Edward Patrick Marques, Geanni, Paulo Silas, Luiz Tatagiba, Renata Gonçalves e Silvio Mendes que contribuíram com a realização desta pesquisa.

Aos professores do LAMAV que compartilharam o conhecimento e a experiência necessários para concluir este trabalho com êxito.

À equipe do Laboratório de Soldagem do Centro de Tecnologia Rio da White Martins por todo o suporte oferecido para a realização dos experimentos.

Aos colegas do Instituto Federal Fluminense, especialmente aos da Unidade de Formação Cordeiro, que me apoiaram na realização deste trabalho tão importante na minha carreira profissional.

SUMÁRIO

RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICATIVA	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 SOLDAGEM GMAW.....	4
2.1.1 Fundamentos do Processo.....	4
2.2 O ARCO VOLTAICO	6
2.2.1 Características das Regiões.....	6
2.2.2 Emissão Catódica	8
2.2.3 Formação da Escória	9
2.3 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	10
2.3.1 Transferência por Curto-Circuito	13
2.3.2 Transferência Globular	16
2.3.3 Transferência Goticular (<i>Spray</i>)	17
2.4 GASES DE PROTEÇÃO	18
2.3.1 Caracterização dos Gases de Proteção	21
2.3.2 Adição de Hidrogênio em Gases de Proteção.....	23
2.3.3 Descontinuidades associadas ao hidrogênio	25
2.3.3.1 Porosidade	25
2.3.3.1 Trincas.....	27
2.3.4 Influência dos Gases de Proteção.....	28
2.5 ESTABILIDADE DO PROCESSO	32
2.4.1 Indicadores de Estabilidade do Processo.....	33
2.4.1.1 Sinais do Arco Elétrico	33
2.4.1.1.1 Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc)	34
2.4.1.2 Respingos	35
2.4.2 Aquisição e Análise de Sinais do Arco Elétrico	36
2.4.3 Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 MATERIAIS	41
3.2 EQUIPAMENTOS	41
3.3 METODOLOGIA.....	42
3.3.1 Disposição dos equipamentos e fornecimento dos gases de proteção	43
3.3.2 Soldagem das chapas de teste	45
3.3.3 Inspeção visual de solda	46
3.3.4 Geometria dos cordões de solda.....	47
3.3.5 Análise dos sinais do arco elétrico	48
3.3.6 Taxas de respingos e de escória.....	49
3.3.7 Microestrutura do metal de solda e dureza Vickers.....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1 Soldagem das chapas de teste	52
4.2 Inspeção visual.....	54
4.3 Geometria dos cordões de solda.....	63

4.4 Análise dos sinais do arco elétrico	71
4.5 Taxas de respingos e de escória.....	79
4.5.1 Taxa de respingos.....	79
4.5.2 Taxa de escória.....	81
4.6 Microestrutura do metal de solda e dureza Vickers.....	84
5 CONCLUSÕES	87
6 SUGESTÕES	88
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo básico de soldagem GMAW.	4
Figura 2: Composição básica de um sistema de soldagem semiautomática para aplicação GMAW.	5
Figura 3: Esquema da distribuição de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica, (b) Queda na Coluna e (c) Zona de Queda Anódica.	7
Figura 4: Emissão catódica. Esquerda: fase de agrupamento de elétrons sob a camada de óxido. Direita: quebra localizada da camada de óxido e emissão dos elétrons.	8
Figura 5: Cordões de solda feitos pelo processo GMAW com combinação arame / gás de proteção que produz escória (a) e com combinação arame / gás de proteção que não produz escória (b).	9
Figura 6: Esquema das condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio.	10
Figura 7: Sete modos de transferência metálica e seus respectivos padrões de penetração no metal de base.	13
Figura 8: Mapas esquemáticos e qualitativos dos campos de incidência dos principais tipos de transferência metálica em GMAW, em função da corrente e da tensão (à esquerda) e em função do comprimento do arco (à direita).	14
Figura 9: Transferência por curto-circuito.	14
Figura 10: Oscilogramas da transferência por curto-circuito para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O ₂	15
Figura 11: Oscilogramas de corrente de um processo com transferência globular em 250ms. Arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: CO ₂	16
Figura 12: Variação no volume das gotas em função da corrente de soldagem.	17
Figura 13: Oscilogramas de um processo com transferência spray. Arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O ₂	18
Figura 14: Influência da configuração da junta na regulagem da vazão do gás de proteção.	22
Figura 15: a) Micrografia apresentando porosidade agrupada. b) Porosidade superficial em um cordão de solda.	25

Figura 16: Trincas de hidrogênio. (a) Aspecto macrográfico (b) Aspecto micrográfico. Ataque Nital. Aumento 100X.	28
Figura 17: Influência do gás de proteção no processo de soldagem GMAW.	29
Figura 18: Aspectos das gotas e o padrão de penetração para diferentes gases de proteção.	30
Figura 19: Diferenças em penetração, em função do gás de proteção.	30
Figura 20: Os efeitos da adição do argônio ao gás de proteção CO ₂	32
Figura 21: Obstrução do bocal por excesso de respingos.	36
Figura 22: Tela de visualização dos sinais instantâneos.	38
Figura 23: Oscilograma de corrente na soldagem por curto-circuito.	39
Figura 24: Oscilograma de tensão na soldagem por curto-circuito.	39
Figura 25: Resumo estatístico dos sinais captados.	40
Figura 26: Fluxograma com as etapas de execução da metodologia.	42
Figura 27: a) Disposição dos equipamentos. b) Misturador de gases e cilindros utilizados. c) mesa de soldagem e coletor de respingos.	43
Figura 28: a) Painel de conexões do SAPV4 e respectivos dispositivos. b) Dispositivos do SAPV4 acoplados à máquina de solda.	44
Figura 29: a) Misturador de gás para soldagem. b) Visualização da Pasta de Cálculo do programa ROTO_BR. Fonte: Lobato e Neto (2003).	45
Figura 30: Parâmetros geométricos de solda. (P) Penetração; (R) Reforço; (L) Largura.	47
Figura 31: Localização dos pontos onde serão realizadas as medidas de dureza Vickers.	51
Figura 32: Oscilogramas de tensão e corrente da transferência por curto-circuito. Chapa de teste 8. Gás: Ar+25%CO ₂	54
Figura 33: Valores de média aritmética e de desvio-padrão da penetração, da largura, do reforço e do índice de convexidade dos cordões de solda.	69
Figura 34: Média aritmética e desvio-padrão de CVPC para cada gás de proteção.	72
Figura 35: Média aritmética e desvio-padrão de CVAA para cada gás de proteção.	73
Figura 36: Média aritmética e desvio-padrão de CVCC para cada gás de proteção.	74

Figura 37: Média aritmética e desvio-padrão de CVT para cada gás de proteção....	75
Figura 38: Média aritmética e desvio-padrão de IVcc para cada gás de proteção....	76
Figura 39: Respingos coletados para cada gás de proteção. a) Ar+25%CO ₂ ; b) Ar+25%CO ₂ +2%H ₂ ; c) CO ₂ ; d) CO ₂ +4%H ₂	80
Figura 40: Escória coletada para cada gás de proteção. a) Ar+25%CO ₂ ; b) Ar+25%CO ₂ +2%H ₂ ; c) CO ₂ ; d) CO ₂ +4%H ₂	82
Figura 41: Micrografias obtidas para cada gás de proteção. a) Ar+25%CO ₂ b) Ar+25%CO ₂ +2%H ₂ c) CO ₂ d) CO ₂ +4%H ₂ . Aumento 250X.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades dos gases de proteção.	21
Tabela 2: Requisitos de composição química para o arame (% em peso).....	41
Tabela 3: Faixas de medição, resolução e a incerteza dos dados que serão captados pelo SAPV4.	44
Tabela 4: Valores de tensão, corrente e tempo de soldagem registrados pelo SAPV4 e a energia de soldagem. Gases de proteção: Ar+25%CO ₂ e Ar+25%CO ₂ +2%H ₂ ...	53
Tabela 5: Valores de tensão, corrente e tempo de soldagem registrados pelo SAPV4. Gases de proteção: CO ₂ e CO ₂ +4%H ₂	53
Tabela 6: Características geométricas: macrografias, largura (L), reforço (R), penetração (P) e índice de convexidade (IC).	63
Tabela 7: Média aritmética e desvio-padrão de penetração, largura, reforço, IC, corrente e tensão para cada gás de proteção.	68
Tabela 8: Média aritmética e desvio-padrão para picos de corrente, período de arco aberto, período de curto-circuito e período de transferência.	71
Tabela 9: CVPC para os quatro tipos de gás de proteção.	72
Tabela 10: CVAA para os quatro tipos de gás de proteção.	73
Tabela 11: CVCC para os quatro tipos de gás de proteção.	74
Tabela 12: CVT para os quatro tipos de gás de proteção.	75
Tabela 13: IVcc para os quatro tipos de gás de proteção.	76
Tabela 14: Valores de p (bilateral) para a comparação entre as médias obtidos pelo programa BioEstat 5.0.....	77
Tabela 15: Dados para o cálculo da taxa de respingos.....	80
Tabela 16: Dados para o cálculo da taxa de escória.....	82
Tabela 17: Valores de dureza Vickers medidos no metal de base, na zona termicamente afetada e no metal de solda.	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos tipos de transferência metálica e respectivo processo de soldagem feita pelo IIV.....	11
Quadro 2: Gases de proteção para os processos GMAW, comportamento químico e aplicações.	19
Quadro 3: Porosidade – Causas e possíveis soluções.	26
Quadro 4: Índices para mensurar a estabilidade do processo no modo de transferência por curto-circuito.	34
Quadro 5: Composição do gás e nomenclatura adotada.	45
Quadro 6: Principais microestruturas do metal de solda de aços ferríticos.....	50
Quadro 7: Cordões de solda depositados para os quatro gases de proteção.....	56
Quadro 8: Fotografias das chapas para a inspeção visual de solda.	62

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da adição de 2% de H₂ no gás de proteção Argônio+25%CO₂ e de 4% de H₂ no gás CO₂ na soldagem GMAW de aço de baixo carbono na transferência por curto-circuito. A metodologia constituiu na avaliação da estabilidade do processo, por meio da inspeção visual de solda, da geometria dos cordões, da análise dos sinais do arco elétrico, da quantificação da geração de escória e de respingos, da microestrutura do metal de solda e da dureza Vickers. Nos teores utilizados, os resultados mostram que: a adição de H₂ não ocasiona descontinuidades superficiais nos cordões de solda; a adição de H₂ em Argônio+25%CO₂ aumenta a penetração e a largura, diminui o reforço e o índice de convexidade dos cordões de solda, e em CO₂, aumenta a penetração, diminui a largura, aumenta o reforço e o índice de convexidade dos cordões de solda; Os cordões de solda com a melhor geometria ocorreram com Ar+25%CO₂+2%H₂ devido ao melhor índice de convexidade e maior profundidade de penetração; os índices dos sinais elétricos indicam que a adição de H₂ no gás Argônio+25%CO₂ não altera a estabilidade do arco elétrico, e em CO₂, a estabilidade melhora significativamente; a adição de H₂ reduz a quantidade e o tamanho dos respingos produzidos e pode gerar mais escória; a adição de H₂ nos gases não ocasionou diferenças significativas dos constituintes microestruturais ou de dureza Vickers. Foi possível concluir também que, de uma forma geral, a adição de 2% de H₂ no gás Argônio+25%CO₂ não muda a estabilidade do processo e que a adição de 4% de H₂ no gás de proteção CO₂ melhora significativamente a estabilidade do processo. A metodologia da coleta dos respingos foi eficiente, mas há necessidade de realizar outros experimentos para quantificar a escória.

ABSTRACT

The goal of this research study is to evaluate the consequences of adding 2% H₂ to Ar+25%CO₂ protection gas and 4% H₂ to CO₂ gas, both of which are used in low-carbon steel gas metal arc welding short-circuit transfer. The study evaluated the stability of the process through visual inspections, the assessment of weld bead geometry, analysis of the electric arc, assessment of slag and spatter, examination of the microstructure of the welded metal and the calculation of Vickers hardness. The results show that adding H₂ to the gases does not result in superficial welding discontinuities. However, when it is added to Ar+25%CO₂, it increases penetration and bead width, decreases weld strength and bead convexity, and when added to CO₂, it increases penetration, decreases bead width, increases weld strength and bead convexity. The Ar+25%CO₂+2%H₂ mixture produced the welds with the best proportions because it increased both bead convexity and penetration. Additionally, the indexes of the electrical signals indicate that adding H₂ to Ar+25%CO₂ does not affect the stability of the electric arc; however, the stability of the electric arc improves significantly when it is added to CO₂. Furthermore, adding H₂ to the gases reduces the amount and size of spatters, but generates more slag. Moreover, adding H₂ to the gases did not significantly affect the microstructure of the welded metals or Vickers hardness. The research study also found that adding 2% H₂ to Ar+25%CO₂ does not affect the stability of the process, but adding 4% H₂ to CO₂ protection gas significantly improves the stability of the process. The methodology used to calculate the amount of splatter was efficient, but other studies need to be carried out to precisely calculate the amount of slag produced.

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW se baseia na fonte de calor de um arco elétrico estabelecido entre um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A região da solda é protegida por um gás inerte, ativo ou uma mistura deles. GMAW é uma sigla adotada pela *American Welding Society* que significa *Gas Metal Arc Welding*. O processo também pode ser chamado de MIG/MAG que advém do inglês onde MIG significa *Metal Inert Gas* (proteção por um gás, ou mistura, inerte) e MAG, *Metal Active Gas* (mistura de um ou mais dos gases ativos com gases inertes ou o CO₂) (Ponomarev e Scotti, 2008).

O processo de soldagem GMAW é utilizado na fabricação, manutenção, recuperação de peças e equipamentos, bem como em revestimentos de superfícies metálicas com materiais especiais. Este processo de soldagem é de alta taxa de deposição que pode ser mecanizado ou automatizado, além de ser aplicado na soldagem de diferentes tipos de materiais numa ampla faixa de espessuras (Bracarense *et al.*, 2007).

No processo de soldagem GMAW, o gás de proteção influencia em vários aspectos a operação, como emissão de fumos e gases, proteção contra a atmosfera ambiente, tipo de transferência metálica, ignição e estabilidade do arco, quantidade de respingos e escória, geometria do cordão de solda ou alterações nas propriedades metalúrgicas e mecânicas do material (Suban e Tusek, 2001). Diante da significativa influência do gás de proteção na soldagem GMAW, o seu estudo se torna atraente para o desenvolvimento de misturas que atendam a necessidades específicas das empresas.

Tatagiba (2015) afirma que no processo GMAW a adição de hidrogênio em quantidades específicas nos gases de proteção CO₂ e Argônio + 25% CO₂ melhora a estabilidade do arco elétrico, a aparência e a geometria dos cordões de solda, bem como reduz a quantidade de escória e respingos, sem comprometer as propriedades mecânicas do metal de solda. No entanto, os experimentos foram realizados com poucos corpos de prova (devido à grande quantidade de gases de proteção sendo testados) e a avaliação de escória e de respingos foi qualitativa.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal foi avaliar os efeitos da adição de 2% de H₂ no gás de proteção Argônio+25%CO₂ e de 4% de H₂ no gás CO₂ na soldagem GMAW de aço de baixo carbono no que diz respeito à estabilidade do processo, comparando os resultados dos gases com hidrogênio com os convencionais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar inspeção visual para detecção de descontinuidades superficiais;
- Analisar o aspecto e a geometria dos cordões, por meio de inspeção visual e macrografias;
- Monitorar os sinais elétricos para avaliação quantitativa da estabilidade do arco elétrico;
- Medir taxa de geração de respingos e de escória para identificar mudanças nessas taxas devido à presença do hidrogênio;
- Identificar os constituintes microestruturais do metal de solda e medir a dureza Vickers.

1.3 JUSTIFICATIVA

As indústrias em seus sistemas produtivos exigem que os métodos de produção e seus equipamentos se desenvolvam com o foco na alta produtividade, uma vez que o mercado se encontra cada vez mais competitivo. A soldagem GMAW tem sido foco de pesquisas científicas voltadas principalmente para o desenvolvimento de equipamentos e arames cada vez melhores e mais adequados.

O gás utilizado para proteger a região de soldagem influencia o processo de maneira significativa. No entanto, Tatagiba *et al.* (2012) evidenciam, por meio de uma análise histórica, que as patentes sobre a formulação de novos gases de proteção não acompanharam o progresso tecnológico dos equipamentos e de eletrodos nas últimas décadas.

No processo de soldagem GMAW usa-se principalmente argônio (Ar), hélio (He), dióxido de carbono (CO₂) e oxigênio (O₂) (Ponomarev e Scotti, 2008). O

hidrogênio é o gás que possui o maior valor de calor específico entre os que são utilizados na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos com proteção gasosa, além de possuir alta condutividade térmica. Essas condições aumentam a tensão do arco elétrico, gerando mais calor e elevando o valor de penetração do cordão de solda (Teske, 2000).

A formulação de novos gases adequados às diversas necessidades das empresas se torna um tema relevante para o desenvolvimento de pesquisa, como é o caso da adição do hidrogênio em gases de proteção convencionais. Diante das suas características peculiares, os resultados poderão evidenciar os seus efeitos para a soldagem de aços carbono no processo GMAW.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM GMAW

2.1.1 Fundamentos do Processo

O processo de soldagem GMAW é um método de união de materiais a arco elétrico que utiliza um arame eletrodo continuamente alimentado. A região de soldagem é protegida por um gás ativo, inerte ou por uma mistura deles (Weiss, 2010). Este processo pode ainda gerar escória que consiste numa camada de óxidos na superfície do cordão de solda. A Figura 1 é a representação da soldagem GMAW.

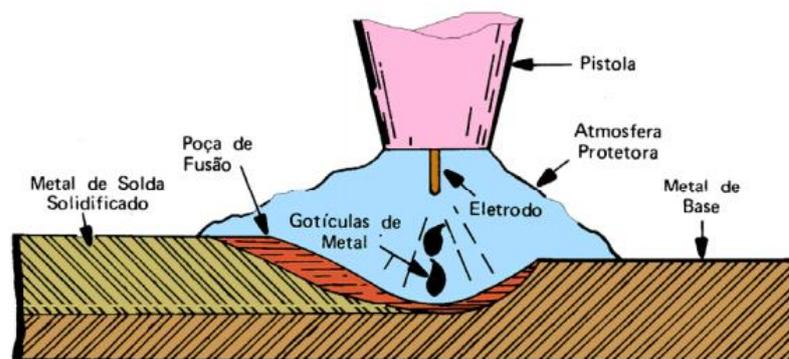


Figura 1: Processo básico de soldagem GMAW.

Fonte: FBTS (2015).

De acordo com Ponomarev e Scotti (2008), a escolha do gás de proteção depende dos materiais e do modo de operação do processo. No processo de soldagem GMAW, usa-se principalmente argônio (Ar), hélio (He), dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio (O_2). Modenesi e Bracarense (2009) afirmam que são consideradas três principais formas de transferência metálica do arame para o metal de base: por curto-circuito, globular e goticular (ou por *spray*).

A Figura 2 mostra os equipamentos para a soldagem GMAW. Os componentes básicos são fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem e uma fonte de gás de proteção. O cabo terra que fica em contato com a peça é ligado ao polo negativo da fonte e a tocha é conectada ao polo positivo. As

máquinas de solda GMAW podem utilizar outros dispositivos como uma unidade de refrigeração (para a água) da tocha de soldagem ou sistemas de movimentação para a soldagem mecanizada.

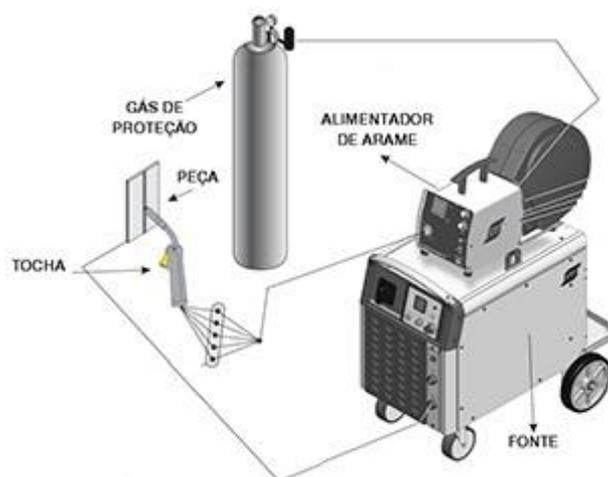


Figura 2: Composição básica de um sistema de soldagem semiautomática para aplicação GMAW.

Fonte: adaptado de ESAB (2014).

Moino e Fiorello (1984) destacam que o processo GMAW pode soldar numa faixa de corrente de 60 a 500 A, com taxa de deposição de 1 a 15kg/h e diluição de 10 a 30%. A espessura mínima para soldagem é de 1,5 mm na soldagem automática e 3 mm na semiautomática. As vantagens e limitações do processo estão relacionadas abaixo.

Vantagens:

- Taxa de deposição elevada;
- Menor necessidade de operações de acabamento;
- Baixo teor de hidrogênio;
- Soldagem em todas as posições;
- Aplicação em todos os tipos de juntas;
- Execução de soldagem relativamente fácil.

Limitações:

- Possibilidade de trincas por causa do brusco resfriamento;
- Soldagem em locais de difícil acesso devido ao uso da tocha;

- Equipamento caro quando comparado ao processo de soldagem por eletrodo revestido.

Os parâmetros elétricos de operação do arco na soldagem GMAW devem estar ajustados rigorosamente para se obter um determinado conjunto de características para o cordão de solda. A sensibilidade à variação desses parâmetros é a principal limitação desse processo e influencia diretamente o resultado final da operação. A dificuldade que há em determinar esses valores é decorrente da forte interdependência deles e por sua influência no cordão de solda depositado (Bracarense *et al.*, 2007).

2.2 O ARCO VOLTAICO

2.2.1 Características das Regiões

Ponomarev e Scotti (2008) definem o arco elétrico como a região plasmática localizada entre a ponta do eletrodo e o metal de base, por onde passa uma corrente elevada que produz alta intensidade de calor e luz. A união dos materiais por fusão ocorre por meio da ação direta do arco. De acordo com Bracarense *et al.* (2007), o arco de soldagem é caracterizado pela diferença de potencial entre suas extremidades, assim como pela corrente elétrica que circula pelo sistema.

Modenesi e Bracarense (2009) afirmam que a queda de tensão ao longo do arco não é uniforme. A Figura 3 mostra que o arco elétrico é dividido em três regiões, com as seguintes características:

a) Queda Catódica.

- Queda de tensão (V_c) = 1 a 15 V.

- Elevado gradiente (campo) elétrico: $\approx 10^8$ V/m.

- Elevado gradiente térmico $\approx 10^5 - 10^6$ K/m

- Contração: $\approx 10^6 - 10^{14}$ A/m²

b) Queda na Coluna (Coluna de Plasma);

- Queda de tensão (V_{cp}): $E \cdot l_a$, onde E é o campo elétrico na coluna e depende de vários fatores (principalmente da composição do gás de proteção) e l_a é o comprimento do arco em milímetros.

- Altas temperaturas (suficiente para ionizar o gás que irá formar o plasma).

- Equilíbrio térmico (ou quase-equilíbrio térmico).

- Equilíbrio elétrico.

- Fluxo de matéria (em soldagem, este é, geralmente, do eletrodo para a peça).

c) Queda Anódica;

- Queda de tensão (V_a): 1 a 10 V.

- Elevado gradiente (campo) elétrico: $\approx 10^6$ - 10^7 V/m.

- Elevado gradiente térmico: $\approx 10^5$ - 10^6 K/m.

- Contração (aumento da densidade de corrente em relação à coluna de plasma): $\approx 10^6$ - 10^9 A/m².

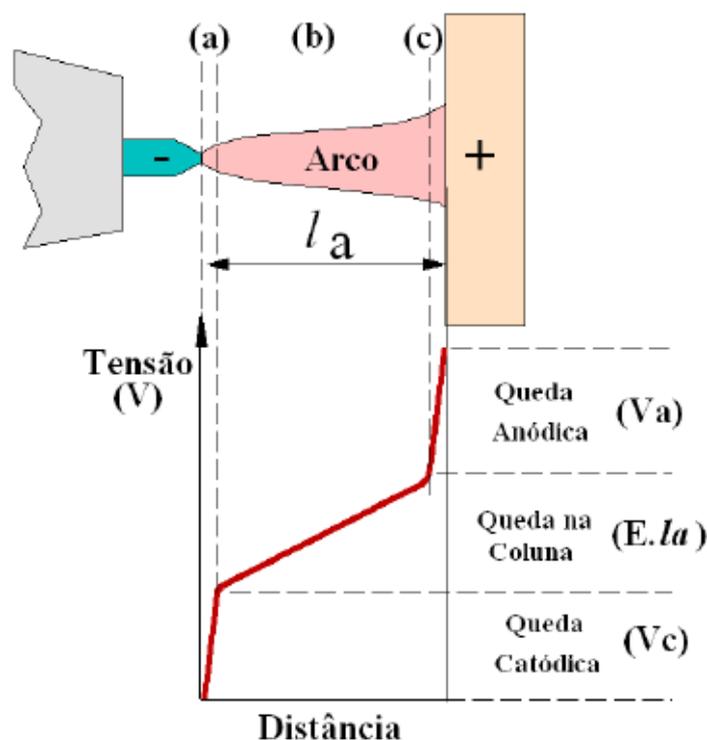


Figura 3: Esquema da distribuição de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica, (b) Queda na Coluna e (c) Zona de Queda Anódica.

Fonte: Modenesi e Bracarense (2009).

2.2.2 Emissão Catódica

Na soldagem com eletrodo consumível, os elétrons são transferidos devido à emissão catódica conforme representação da Figura 4. A emissão dos elétrons ocorre mais facilmente pelas camadas de óxidos (poça de fusão e arredores) que possuem ligações elétrons-átomos mais fracas que as do próprio metal, tornando-as carregadas positivamente. A tensão elevada, originada entre a camada e o metal de base, propiciam condições para agrupamento dos elétrons que aceleram em direção ao ânodo, sem necessidade de tensão muito elevada entre ânodo e chapa. A aceleração é capaz de remover esta camada de óxido local, atravessando em pontos específicos e viajando para o ânodo através da coluna de plasma (Ponomarev e Scotti, 2008).

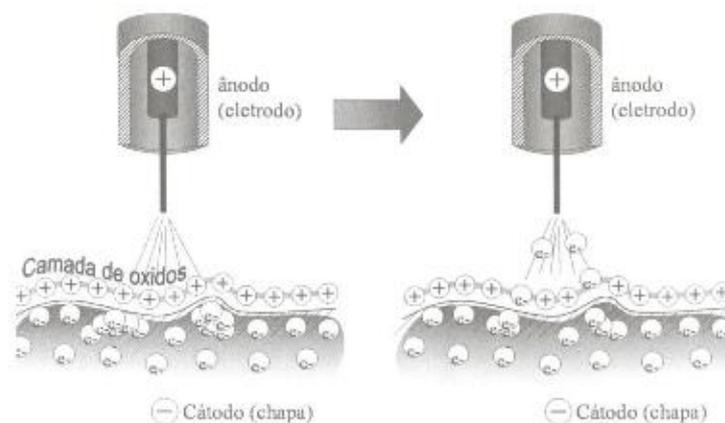


Figura 4: Emissão catódica. Esquerda: fase de agrupamento de elétrons sob a camada de óxido. Direita: quebra localizada da camada de óxido e emissão dos elétrons.

Fonte: Ponomarev e Scotti (2008).

A adição de óxidos nos gases de proteção é necessária para que haja maior estabilidade da soldagem com eletrodo consumível, pois assim, o arco elétrico não busca óxidos em regiões distantes do seu eixo. Para o caso de alumínio e suas ligas, capazes de produzir óxidos com facilidade, é possível soldar com Argônio ou Hélio puro. Já os aços carbono, com baixa facilidade de oxidação, precisam do teor oxidante (Ponomarev e Scotti, 2008).

Segundo Ponomarev e Scotti (2008), em contraste com os gases oxidantes, existem os gases redutores como o hidrogênio e o nitrogênio. Estes gases protegem o metal aquecido da oxidação e reduzem os óxidos da superfície. Na soldagem

GMAW, os gases redutores se comportam como gases inertes ao analisar a estabilidade do arco.

2.2.3 Formação da Escória

De acordo com Ponomarev e Scotti (2008), o silício (Si) e o manganês (Mn) são os principais desoxidantes usados em arames para aços carbono e baixa liga. Esses elementos reagem com o O₂ (oxigênio) adicionado propositalmente ao gás de proteção para facilitar a emissão de elétrons, formando óxidos que vão para a superfície dos cordões após a solidificação. Essa camada de óxidos dá origem a escória. Se o arame utilizado for de alto teor desoxidante (como é o caso do arame AWS ER70S-6) e o gás tiver pouco poder de oxidação, como por exemplo uma mistura de argônio com O₂ e/ou CO₂ (dióxido de carbono) com baixo percentual, não haverá oxigênio suficiente para reagir com os elementos desoxidantes e os mesmos vão para o cordão como elementos de liga. O Mn pode ser benéfico, mas um alto teor de Si pode fragilizar o metal de solda de aços. Um cordão com pouca ou nenhuma escória pode significar uma seleção correta de gás e arame (arame com baixo teor desoxidante e gás com baixo potencial de oxidação), mas também pode indicar uma seleção incorreta (arame com baixo teor desoxidante e gás com alto potencial de oxidação), resultando em porosidade ou em propriedades mecânicas não conformes. A Figura 5 mostra cordões de solda feitos pelo processo de soldagem GMAW com a combinação arame / gás de proteção que produz escória (a) e outra combinação que não produz escória (b).

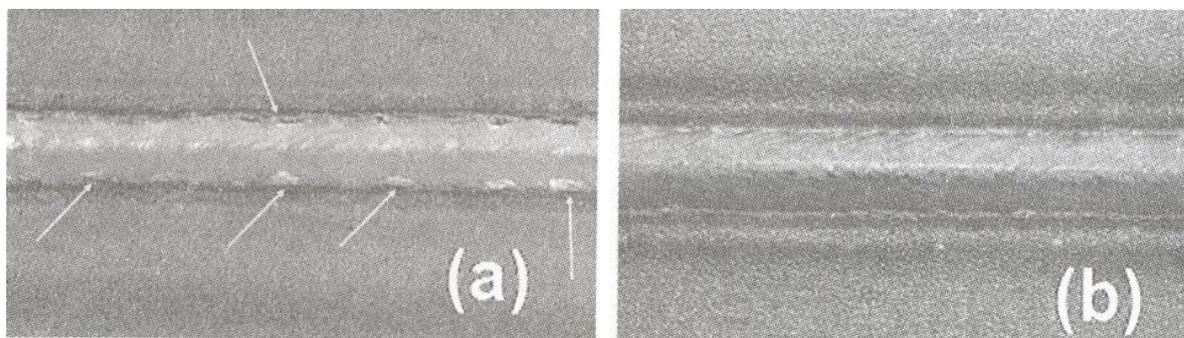


Figura 5: Cordões de solda feitos pelo processo GMAW com combinação arame / gás de proteção que produz escória (a) e com combinação arame / gás de proteção que não produz escória (b).

Fonte: (Ponomarev e Scotti, 2008).

Em relação às características da escória, de uma forma geral, consideram-se ponto de fusão, densidade, viscosidade, tensão superficial e facilidade de remoção após a soldagem. Em GMAW, essa fina camada de escória não tem a função de proteger a região de solda da queda brusca de temperatura, como ocorre em outros processos. A escória em soldagem deve oferecer baixa permeabilidade aos gases (para que não fique retido no metal de solda), além de se solidificar a uma temperatura mais elevada do que a do metal de solda e também deve ser menos densa para que possa flutuar em sua superfície. Estruturas cristalinas em materiais não-metálicos tem comportamento de contração durante o resfriamento diferente do aço. Por isso, a escória com alguma cristalinidade tende a se soltar durante o resfriamento na soldagem dos aços, ajudando na sua remoção e limpeza (Linnert, 1994).

2.3 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

A Figura 6 mostra os campos operacionais das principais formas de transferência metálica. Ao utilizar argônio como gás de proteção, a transferência por curto-circuito é estável para baixos valores de tensão numa ampla faixa de corrente. A transferência globular ocorre para maiores valores de tensão e para correntes mais baixas. A transferência por *spray* ocorre para valores maiores de tensão e de corrente.

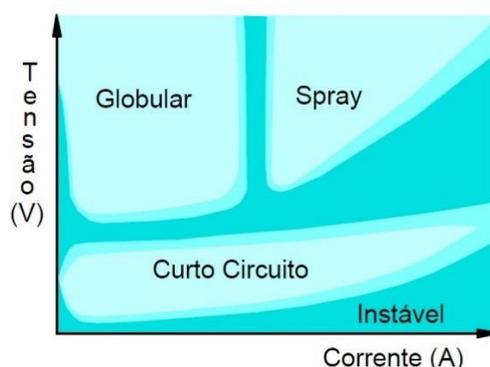
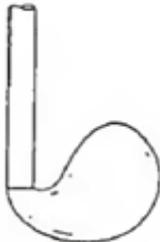


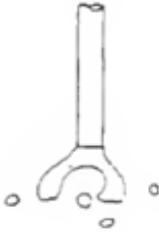
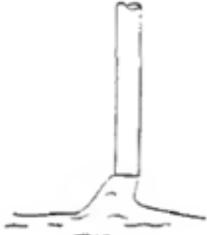
Figura 6: Esquema das condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio.

Fonte: Modenesi e Bracarense (2009).

Além das principais transferências metálicas existem outras formas, como por exemplo a transferência globular repulsiva, ou ainda, diferentes formas de transferência *spray*. O *International Institute of Welding* (IIW) classifica os tipos de transferência metálica conforme o Quadro 1.

Quadro 1: Classificação dos tipos de transferência metálica e respectivo processo de soldagem feita pelo IIW.

Designação do tipo de transferência		Processo de Soldagem	Esquema de destacamento da gota
Transferência por voo livre - Globular	Gotas (<i>Drop</i>)	GMAW baixa corrente	
	Repelido (<i>Repelled</i>)	GMAW protegida com CO ₂	
Transferência por voo livre - Goticular (<i>Spray</i>)	Projetado (<i>Projected</i>)	GMAW corrente intermediária	
	Com alongamento (<i>Streaming</i>)	GMAW média corrente	

	Rotacional (<i>Rotating</i>)	GMAW alta corrente	
	Explosiva (<i>Explosive</i>)	Eletrodos revestidos	
Transferência por contato	Curto-circuito (<i>Short-circuiting</i>)	GMAW curto-circuito	
	Contato sem interrupção	Soldagem com adição de metal	-
Transferência protegida por escória	Fluxo guiado pela parede (<i>Flux-wall-guided</i>)	Arco Submerso	
	Outros modos	Eletrodo revestido, Eletrodo tubular, Eletroescória	-

Fonte: adaptado de Liu e Siewert (1989).

A Figura 7 relaciona tipos de transferência metálica com o padrão de penetração formado no metal de base. A forma como o metal é transferido do arame para a peça influencia significativamente no perfil de penetração.

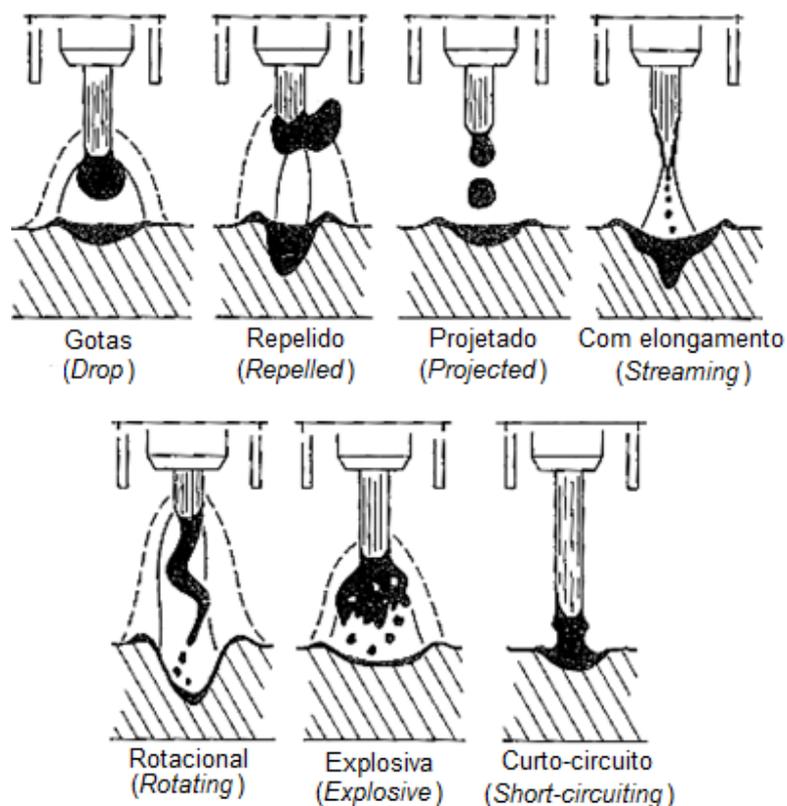


Figura 7: Sete modos de transferência metálica e seus respectivos padrões de penetração no metal de base.

Fonte: adaptado de Linnert (1994).

2.2.1 Transferência por Curto-Circuito

Na transferência por curto-circuito, a ponta do eletrodo atinge periodicamente a poça de fusão, ocasionando o curto-circuito elétrico e o arco se extingue momentaneamente. Essa transferência acontece em valores de correntes e tensões de soldagem baixas (a força eletromagnética é baixa, o que permite um grande diâmetro crítico da gota e arcos curtos para que a gota toque a poça antes de se destacar). A frequência de curtos-circuitos é de 20 a 200 vezes por segundo (Ponomarev e Scotti, 2008). A Figura 8 ilustra os mapas esquemáticos e qualitativos dos campos de incidência dos principais tipos de transferência metálica em GMAW em função da corrente e da tensão (à esquerda) e em função do comprimento do arco (à direita).

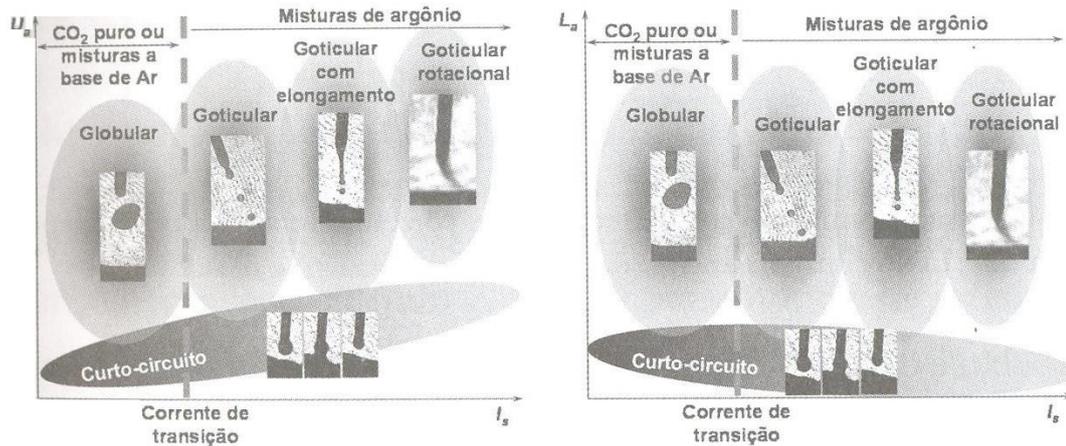


Figura 8: Mapas esquemáticos e qualitativos dos campos de incidência dos principais tipos de transferência metálica em GMAW, em função da corrente e da tensão (à esquerda) e em função do comprimento do arco (à direita).

Fonte: Ponomarev e Scotti (2008).

A Figura 9 ilustra o comportamento dos sinais do arco elétrico na transferência por curto-circuito. No primeiro estágio (A), o arco está aberto com determinado valor de tensão e corrente em nível mínimo. No instante em que a gota toca a poça de fusão (B), ou seja, no início do curto-circuito, a tensão cai bruscadamente e o valor da corrente começa a aumentar. Durante este período, o arco se extingue e ocorre a transferência do arame para o metal de base. A tensão se mantém baixa e a corrente continua a crescer (C) até o fim do curto-circuito (D), quando tensão e corrente retornam para os valores iniciais do ciclo (A).

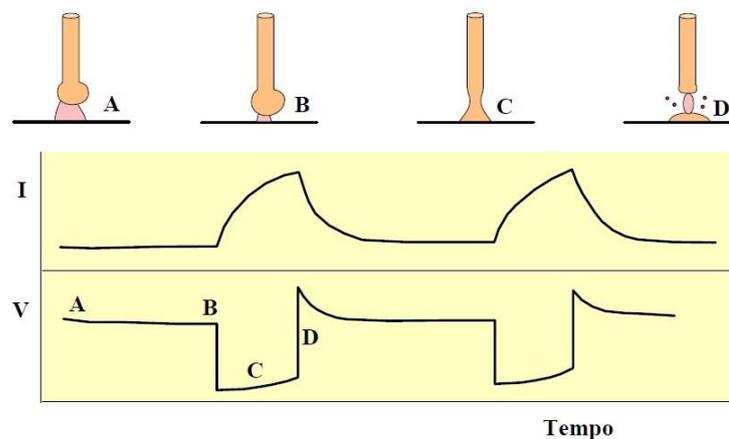


Figura 9: Transferência por curto-circuito.

Fonte: Modenesi e Bracarense (2009).

A Figura 10 apresenta oscilogramas de tensão e corrente em função do tempo gerados a partir do monitoramento dos sinais elétricos na transferência por curto-circuito, utilizando um arame de aço inoxidável de 1,0 mm de diâmetro com gás de proteção Argônio + 2% O₂. Apesar dos picos de corrente e tensão, as médias desses valores são baixas.

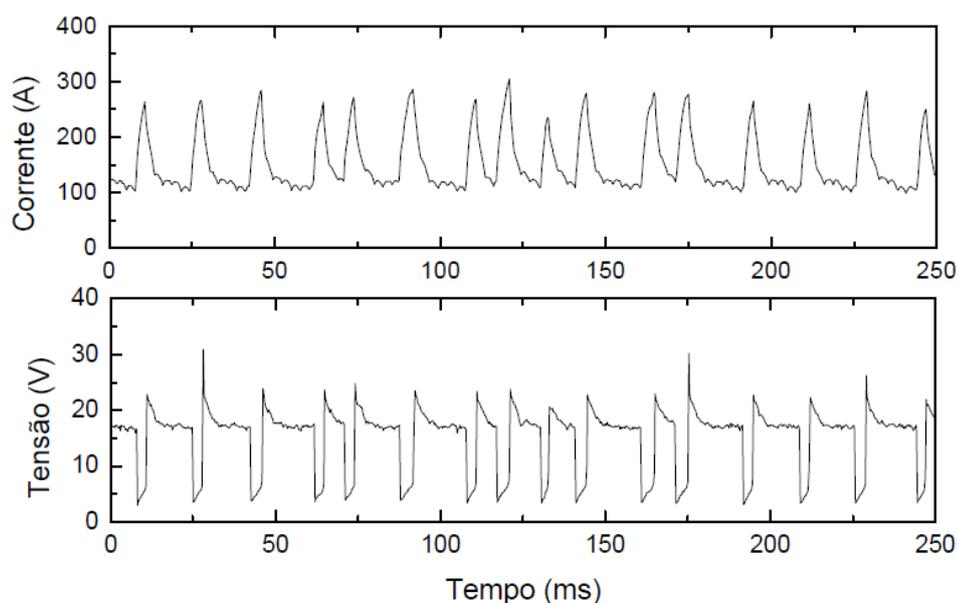


Figura 10: Oscilogramas da transferência por curto-circuito para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O₂.

Fonte: Modenesi e Bracarense (2009).

O modo de transferência por curto-circuito ocorre pelo contato físico do eletrodo com a poça de fusão. Este fenômeno implica em períodos de extinção do arco voltaico em que o eletrodo não se funde. Os ajustes nos parâmetros do processo para obtenção do equilíbrio entre a velocidade de avanço do eletrodo no arco e a sua velocidade de fusão durante a fase do arco são fundamentais para que haja regularidade na transferência metálica (Dutra e Baixo, 1995).

De acordo com Linnert (1994), esse tipo de transferência é muito eficiente na soldagem de chapas com seções finas. Usando um eletrodo de diâmetro pequeno, como por exemplo, o de 0,5 mm e ajustando precisamente a fonte de energia para fornecer um baixo nível de corrente, a transferência por curto-circuito permite unir chapas de 0,7 mm com o uso do gás CO₂ (baixo custo e atende bem na proteção da soldagem de aços carbono de baixa liga). As misturas dos gases argônio e CO₂

melhoram as condições de soldagem de chapas ainda mais finas. Este mecanismo de transferência permite:

- Controlar a penetração da junta para evitar fusão excessiva no material de base;
- Conectar juntas com aberturas de raiz excessivas;
- Soldar em todas as posições com facilidade similar.

2.2.2 Transferência Globular

Ponomarev e Scotti (2008) afirmam que a transferência globular ocorre ao utilizar tensões de arco de moderadas a altas (arcos longos para não ter curto-circuito) e correntes baixas (forças eletromagnéticas não significativas), ocasionando a transferência irregular de gotas maiores que o diâmetro do eletrodo, em baixa frequência de destacamento (1 a 10 gotas/segundo).

A Figura 11 mostra o comportamento de tensão e corrente em função do tempo para a transferência globular na soldagem com o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro com gás de proteção CO₂. Os valores de corrente variam pouco e em torno de 150 A (corrente relativamente baixa). Os valores de tensão, que são de moderadas a altas, estão em torno de 30 V.

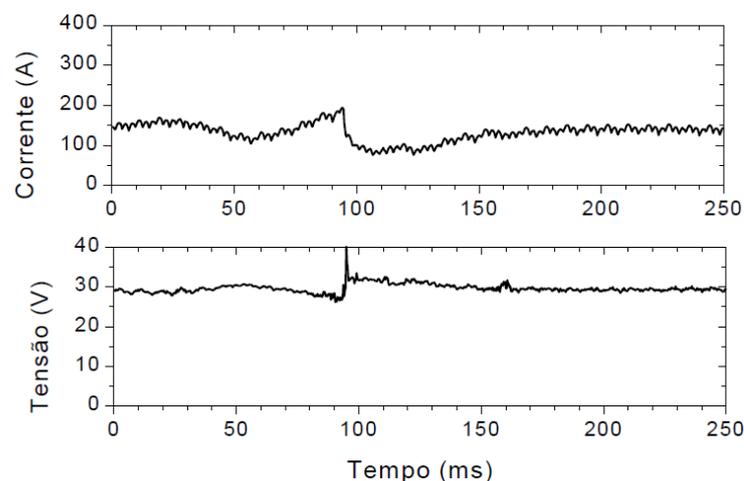


Figura 11: Oscilogramas de corrente de um processo com transferência globular em 250ms. Arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: CO₂.

Fonte: Modenesi e Bracarense (2009).

De acordo com Resende (2007), a transferência globular tem as seguintes características:

- Não é adequada para soldagem fora de posição devido ao destacamento das gotas ocorrer pela ação da gravidade;
- Nível de respingos relativamente elevado;
- Quantidade de calor transferida à peça a ser soldada é intermediária, quando comparada aos outros tipos de transferência;
- Pode gerar falta de penetração, falta de fusão ou reforço excessivo do cordão de solda.

2.2.3 Transferência Goticular (*Spray*)

Na transferência goticular (ou por *spray*), pequenas gotas com o tamanho uniforme e próximo ao diâmetro do eletrodo são transferidas, de forma sequencial e em alta frequência (Ponomarev e Scotti, 2008). Modenesi e Bracarense (2009) destacam que essa transferência ocorre na soldagem GMAW ao utilizar argônio e eletrodo ligado no polo positivo.

A medida que a corrente de soldagem aumenta, o diâmetro das gotas que estão sendo transferidas se reduz até atingir a corrente de transição. A Figura 12 mostra a faixa de corrente que ocorre a corrente de transição. Abaixo da curva a transferência é globular e acima é goticular (Brandi *et al.*, 2004).

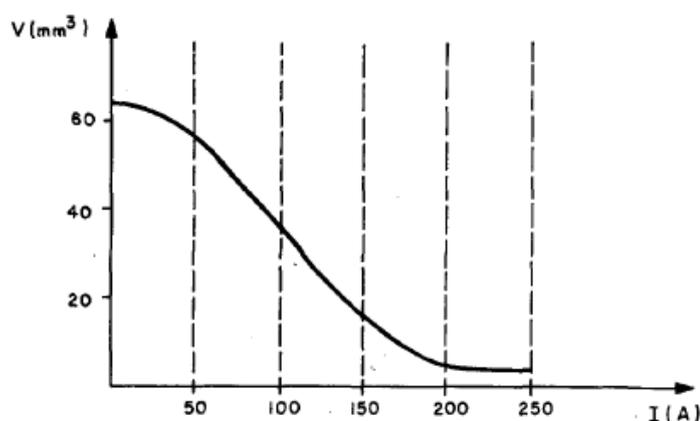


Figura 12: Variação no volume das gotas em função da corrente de soldagem.

Fonte: Taniguchi (1982).

A Figura 13 mostra oscilogramas na soldagem com transferência por *spray* utilizando o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro com gás de proteção Argônio + 2% O₂. Os valores de corrente elevados estão em torno de 290 A e não variam significativamente. Os valores de tensão elevados estão em torno de 30 V.

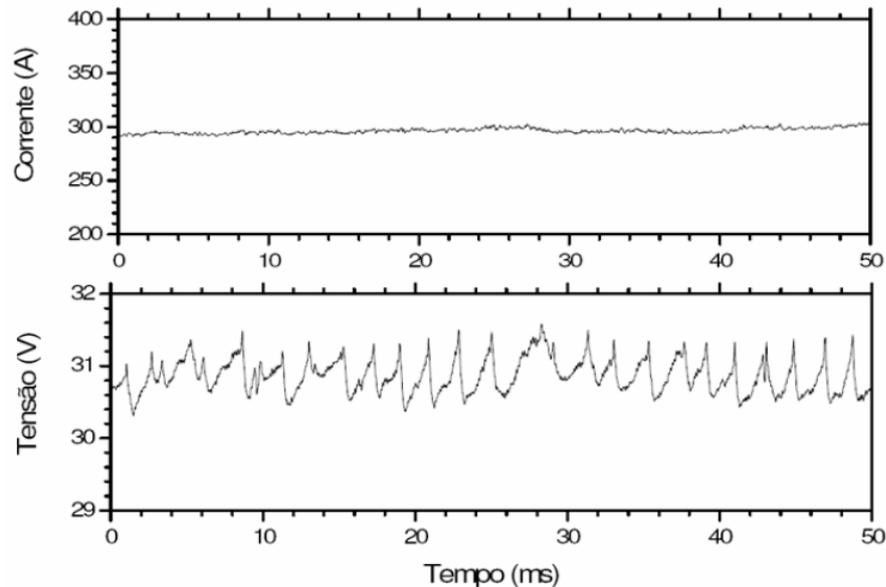


Figura 13: Oscilogramas de um processo com transferência *spray*. Arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O₂.

Fonte: Modenesi e Bracarense (2009).

2.4 GASES DE PROTEÇÃO

A função principal do gás de proteção é expulsar o ar atmosférico da região de soldagem. Os gases nitrogênio, oxigênio e vapor d' água (H₂O) presentes no ar podem afetar a aparência e as propriedades do cordão de solda. Os seus efeitos estão relacionados abaixo:

- Nitrogênio: Reduz a ductilidade e a tenacidade da solda e pode causar fissuração, além disso, em grandes quantidades pode causar porosidade;
- Oxigênio: Ao combinar com o carbono, forma o monóxido de carbono (CO), que aprisionado no metal, ocasiona porosidade. Em excesso, o oxigênio pode se combinar com outros elementos, como o manganês e o silício, e formar compostos que produzem inclusões no metal de solda;

- Hidrogênio: Proveniente do vapor d' água e do óleo (falta de limpeza adequada), combina-se com o Ferro (Fe) ou com o Alumínio (Al), ocasionando porosidade capaz de fissurar o cordão de solda (ESAB, 2005).

O Quadro 2 mostra os tipos de gás de proteção utilizados em GMAW, seus comportamentos químicos e aplicações. Os gases Ar e/ou He são inertes (não alteram a composição química do metal de solda) e são utilizados na soldagem de materiais não-ferrosos. Os gases de proteção que contêm CO₂ ou O₂ são ativos de comportamento químico oxidante (alteram a composição química do metal de solda), sendo aplicados na soldagem de materiais ferrosos.

Quadro 2: Gases de proteção para os processos GMAW, comportamento químico e aplicações.

Gás de Proteção	Comportamento químico	Aplicações típicas
Argônio (Ar)	inerte	todas as ligas, exceto aços
Hélio (He)	inerte	alumínio, magnésio e cobre; para maiores espessuras e reduzir a porosidade
Ar + (20 - 80%) hélio	inerte	alumínio, magnésio e cobre; para maiores espessuras e reduzir a porosidade; tem melhor ação que 100% He
Ar + (1 - 2%) oxigênio	levemente oxidante	aços inoxidáveis e aços ligados
Ar + (3 - 5%) oxigênio	oxidante	aço carbono e alguns aços de baixa liga
CO ₂	oxidante	aço carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + (20 - 50%) CO ₂	oxidante	aço carbono (transferência por curto-circuito)
Ar + 10% CO ₂ + 5% oxigênio	oxidante	aços carbono (Europa)
CO ₂ + 20% oxigênio	oxidante	aços carbono (Japão)
90%He + 7,5%Ar + 2,5% O ₂	levemente oxidante	aços inoxidáveis para boa resistência à corrosão (transferência por curto-circuito)
(60 - 70%) He + (25 - 35%) Ar + (4 - 5%) CO ₂	oxidante	aços de baixa liga para boa tenacidade (transferência por curto-circuito)

Fonte: adaptado de Teubel (1980).

A *Lincoln Electric Company* (2015) relaciona as principais características dos tipos de gás de proteção utilizados no processo GMAW para a soldagem dos aços carbono:

- Argônio + 1 – 2% Oxigênio: Esta mistura tem aplicação na soldagem de aços inoxidáveis e aços carbono e nos casos que exigem alta velocidade de soldagem na chapa. Aplicação no tipo de transferência por *spray*. A mistura é frequentemente utilizada quando propriedades mecânicas superiores são requeridas com eletrodos de aço carbono e de baixa liga;

- Argônio + 3–5% Oxigênio: Usada também no modo de transferência por *spray*. Aços carbono de grandes seções. O metal-base tem que estar livre de contaminação e com uma fina camada de calamina;

- Dióxido de Carbono (CO₂): É um gás inerte à temperatura ambiente e que reage com a alta temperatura do arco elétrico, ocasionando a dissociação da molécula de CO₂. Neste processo, a molécula se quebra e forma carbono livre, monóxido de carbono e oxigênio na região anódica do arco. Na região catódica (mais fria), os elementos se recombina. O oxigênio se combina com silício, manganês e ferro para formar óxidos que vão para a superfície da solda. Níveis elevados de CO₂ aumentam a quantidade de escória. Durante a recombinação, os níveis de energia elevados na poça de fusão ocasionam um cordão largo e relativamente profundo, característica peculiar da utilização do CO₂ como gás de proteção. Esta mistura é muito utilizada por ser mais barata que as outras ao mesmo tempo em que gera resultados satisfatórios dependendo da aplicação. Há grande geração de respingos;

- Argônio + 20–50% CO₂: A mistura é muito utilizada na indústria e a transferência ocorre por curto-circuito. A quantidade de respingos é reduzida consideravelmente. Na aplicação de soldagem dos aços carbono, melhora o aspecto do cordão de solda;

- Argônio + 10% CO₂ + 5% Oxigênio: Esta mistura ternária pode ocorrer nos modos de transferência por *spray* e curto-circuito nas aplicações em aços carbono. O maior teor de gás inerte reduz a quantidade de respingos quando comparado aos gases de proteção com maiores quantidades de CO₂ ou oxigênio.

2.3.1 Caracterização dos Gases de Proteção

Ponomarev e Scotti (2008) afirmam que o gás de proteção afeta a eficiência da proteção e a estabilidade do arco. A Tabela 1 mostra as propriedades de alguns gases utilizados em soldagem.

Tabela 1: Propriedades dos gases de proteção.

Gás	Símbolo químico	D (kg/m ³)	PI (eV)	CT (mW / m.K)
Argônio	Ar	1,78	15,8	16,4
Dióxido de carbono	CO ₂	1,98	14,4	14,7
Hélio	He	0,18	24,6	142,6
Hidrogênio	H ₂	0,07	13,5	168,3
Nitrogênio	N ₂	1,16	14,5	24
Oxigênio	O ₂	1,33	13,2	24,2

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

Fonte: adaptado de Ponomarev e Scotti (2008).

A eficiência de proteção está relacionada com o tipo de gás, configuração do bocal da tocha e da junta, assim como a vazão do gás. Algumas informações sobre essas variáveis estão descritas abaixo:

- Tipo de gás: os gases inertes (comercialmente, argônio e hélio) não reagem quimicamente com o metal de solda, diferentemente dos ativos puros (CO₂, O₂, N₂ e NO) ou uma combinação desses com gases inertes; quando o gás é mais denso que o ar atmosférico, como é o caso do argônio puro e suas misturas, há melhor proteção na posição plana; fora dessa posição, quanto menor for a densidade do gás, maior a eficiência da proteção;

- Configuração do bocal da tocha: Maiores valores de corrente demandam bocais maiores e mais afastados;

- Configuração da junta: A Figura 14 ilustra como exemplo a influência da configuração da junta na regulagem da vazão do gás de proteção;



Figura 14: Influência da configuração da junta na regulação da vazão do gás de proteção.

Fonte: Ponomarev e Scotti (2008).

- Vazão do gás: O fluxo adequado vai de 10 a 16 l/min, sendo maior para correntes mais elevadas; valores menores podem causar falta de proteção e maiores causam turbulência, possibilitando a inclusão de elementos contaminantes.

A segunda função é a estabilidade do arco que se relaciona com o potencial de ionização, condutividade térmica e potencial de oxidação. As principais características dessas propriedades são:

- Potencial de ionização: é a energia necessária para ionizar o gás (retirar um ou mais elétrons do átomo do gás); um gás com baixo potencial de ionização apresenta maior facilidade na abertura e estabilidade do arco elétrico; para um mesmo comprimento de arco e mesma corrente, a tensão é maior para o gás com maior potencial de ionização; misturas de argônio com gases moleculares ou CO₂ puro demandam maior tensão de soldagem devido às energias para dissociá-los e para ionizar os átomos dos mesmos;

- Condutividade térmica: é a capacidade de o gás conduzir calor; quanto maior o valor, maior é a tensão no arco elétrico; a presença de He, CO₂ ou H₂ no gás de proteção favorece a eficiência da fusão, ocasionando uma zona fundida maior no metal de base; a presença de gases moleculares, como H₂, N₂ e CO₂, pode transferir calor por condução do arco para o metal de base (na poça de fusão) por fenômenos de dissociação e recombinação molecular;

- Potencial de oxidação (PO): é a capacidade do gás de proteção oxidar um metal durante a soldagem; um alto potencial de oxidação do gás pode ser maléfico por oxidar os materiais de solda; metais mais reativos já formam uma camada de óxidos sobre a poça para estabilidade do arco elétrico, os menos reativos, como é o

caso dos aços, necessitam dos gases ativos para obtenção da estabilidade do arco; H₂ e N₂, por serem redutores, agem como se fossem inertes com relação à estabilidade; gases com alto potencial de oxidação reagem com elementos presentes no metal de adição e metal de base, o que acarreta perdas de elementos de liga, afeta a quantidade de escória, taxa de emissão de fumos, fluidez na poça de fusão e propriedades mecânicas do cordão de solda; quanto maiores os teores de O₂ e CO₂ no gás de proteção (maior potencial de oxidação), mais desoxidantes deve ter o arame; esse potencial afeta o formato do cordão de solda, pois modifica a tensão superficial entre o metal fundido e o meio em sua volta (molhabilidade); pequenas adições de oxigênio no argônio formam cordões mais planos, uniformes e com baixa incidência de mordeduras; na transferência metálica, a composição do gás afeta o tamanho da gota e a duração do curto circuito, o que altera a estabilidade do arco; o WII apresenta a Equação 1 para relacionar o PO com oxigênio no metal de solda, sendo aplicada para os valores máximos 25% de CO₂ e 12,5% de O₂.

$$PO = \%O_2 + (\%CO_2 / 2) \quad (1)$$

2.3.2 Adição de Hidrogênio em Gases de Proteção

Hojmans (1994) conclui sobre a influência da adição do hidrogênio no gás de proteção argônio para o processo de soldagem GTAW (proteção gasosa com eletrodo não consumível), no que diz respeito ao arco elétrico e geometria do cordão de solda:

- Há uma contração no arco elétrico. Este efeito está diretamente relacionado a mudanças na distribuição de temperatura no arco devido à condutividade térmica elevada do hidrogênio comparada com a do argônio;

- A tensão do arco elétrico aumenta com o aumento do hidrogênio. Este efeito é atribuído a uma elevação da força do campo elétrico que também está relacionado a condutividade térmica elevada do hidrogênio;

- A adição de hidrogênio no gás de proteção ocasiona maior energia de soldagem e eficiência de fusão. No caso de aço de baixo carbono e aço inoxidável, a energia de soldagem adicional é conduzida, preferencialmente, para o aumento da

profundidade de penetração. Isso acontece devido ao fluxo na poça de fusão que é direcionado para dentro.

Segundo Teske (2006), o hidrogênio tem alto valor de calor específico e de condutividade térmica. Por isso, na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, por proteção gasosa, a presença do hidrogênio aumenta a tensão do arco elétrico, gerando mais calor e penetração no metal de base.

Gülenç *et al.* (2005) citam casos em que o hidrogênio é utilizado na soldagem de aços inoxidáveis e fazem observações com relação aos seus efeitos de sua adição:

- Ao argônio na soldagem de aços inoxidáveis, ligas à base de níquel e níquel-cobre. A adição de hidrogênio ao argônio permite acréscimo da velocidade de soldagem (Althouse *et al.*, 1992);

- Aos gases argônio, hélio e nitrogênio (Suban e Tusek, 2001). Essa adição ocasiona aumento significativo do metal fundido na poça de fusão devido à condutividade térmica da mistura argônio-hidrogênio, alcançando temperaturas em que as moléculas de hidrogênio se dissociam (Lowke *et al.*, 1997);

- Ao argônio na soldagem de aços inoxidáveis de alta liga. A mistura argônio-hidrogênio pode ser usada nos processos MIG e TIG (Tusek e Suban, 2000).

Tatagiba (2015) conclui sobre os efeitos da adição de 2% de H₂ no gás de proteção Argônio + 25%CO₂ e de 4% de H₂ no gás CO₂ no processo GMAW para a soldagem de aços carbono:

- De acordo com a observação visual, a quantidade de respingos diminuiu, no entanto, não foi possível comprovar esta tendência de forma qualitativa devido à imprecisão e quantidade insuficiente de dados;

- Apresentou ligeira tendência à melhora do índice de convexidade e aumento da profundidade de penetração;

- Para a mistura à base de argônio, a adição de hidrogênio apresentou ligeira tendência de melhoria na estabilidade do arco elétrico e para CO₂ essa tendência também ocorreu, sendo inclusive mais forte;

Linnert (1994) afirma que a adição de hidrogênio no gás de proteção na soldagem do aço pode propiciar a formação de trincas por hidrogênio, quando há um estado de tensões crítico e uma microestrutura frágil. Ao adicionar hidrogênio em quantidades superiores a 5%, ocorre porosidade e os benefícios de se utilizar o hidrogênio para melhorar a estabilidade do arco como gás redutor compromete a qualidade da solda.

2.3.3 Descontinuidades associadas ao hidrogênio

2.3.3.1 Porosidade

Novais (2010) define porosidade como um espaço vazio decorrente da prisão de gás, como é o caso do hidrogênio (H_2) e do monóxido de carbono (CO), durante o processo de solidificação. O espaço vazio pode ter o formato esférico ou cilíndrico (alongado). Trata-se de um defeito volumétrico que pode ser aceito por normas de qualificação de procedimentos e soldadores, até determinadas dimensões e distribuições. De acordo com Hettes e Ketron (1998), o tipo de porosidade define a qualidade da junta soldada. Ela pode ser classificada em função de sua distribuição como:

- porosidade isolada;
- porosidade uniformemente distribuída;
- porosidade agrupada;
- porosidade superficial.

A Figura 15 mostra uma micrografia que apresenta porosidade agrupada (a) e uma fotografia que apresenta porosidade superficial em um cordão de solda (b).

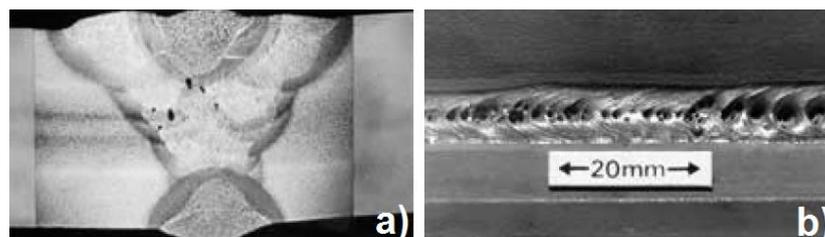


Figura 15: a) Micrografia apresentando porosidade agrupada. b) Porosidade superficial em um cordão de solda.

Fonte: adaptado de Novais (2010).

O Quadro 3 organiza as causas da porosidade e possíveis soluções, de acordo com os respectivos processos de soldagem.

Quadro 3: Porosidade – Causas e possíveis soluções.

Causas	Possíveis Soluções	Processos de Soldagem
Baixa vazão de gás ou obstrução da saída de gás por respingos	Aumentar a vazão de gás e/ou limpar o bocal regularmente	GMAW
Excesso de vazão de gás (turbulência)	Diminuir a vazão de gás para eliminar a turbulência	GMAW
Excessivas correntes de ar	Proteger a região de solda do vento	GMAW / SMAW
Arame oxidado ou sujo	Utilizar exclusivamente arames limpos e secos	GMAW / SAW
Proteção insuficiente devido a elevada velocidade de soldagem	Reduzir a velocidade	GMAW
Tocha muito distante da peça	Aproximar a tocha da peça e, ao final da solda, mantê-la sobre a poça de fusão até que se solidifique	GMAW
Ângulo de deslocamento muito grande.	Diminuir o ângulo de deslocamento da tocha	GMAW
Metal base contaminado (óleo; graxa; tinta; oxidação)	Melhorar a limpeza da peça	GMAW / SAW / SMAW
Tensão muito alta / Corrente muito baixa	Diminuir a tensão / aumentar corrente	GMAW / SAW / SMAW
Contaminação do gás de proteção	Utilizar gases de proteção de alta qualidade e verificar vazamentos, inclusive oring da guia espiral, checar pré-vazão	GMAW
Metal Base com S>0,05% e/ou alto nível de inclusões	Utilizar metais base com S<0,05% e baixo nível de inclusões	GMAW / SAW / SMAW
Arames sem desoxidantes (fora da especificação) ou inadequados	Utilizar consumíveis adequados à aplicação	GMAW / SAW

Fonte: Novais (2010).

2.3.3.1 Trincas

Modenesi *et al.* (2006) comentam que a fissuração pelo hidrogênio é considerada como um dos maiores problemas na soldagem de aços, principalmente para os processos de baixa energia. Para que a fragilização por hidrogênio ocorra, três fatores devem ocorrer simultaneamente:

- Presença de hidrogênio na região de solda: durante a soldagem, o hidrogênio derivado de moléculas de material orgânico e umidade que são dissociadas no arco elétrico é absorvido pela poça de fusão, ficando aprisionado após a solidificação. O hidrogênio se difunde rapidamente no material, alcançando a zona fundida e a zona termicamente afetada, cuja microestrutura é fortemente fragilizada pela sua presença. Com a ocorrência de tensões de tração (residuais e externas), podem ocorrer fissuras no material. À temperatura ambiente, a fragilização pelo hidrogênio é muito intensa.

- Formação de microestrutura de elevada dureza: particularmente, a martensita é mais sensível à fissuração pelo hidrogênio. A Equação 2 é utilizada para saber se um material é sensível a essa fissuração é a do Carbono Equivalente (CE).

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad (\% \text{ em peso}) \quad (2)$$

Se $CE < 0,4$, o aço é insensível à fissuração. Se CE é $> 0,6$, o material é muito sensível, exigindo técnicas especiais de soldagem, como por exemplo, uso de processos de baixo teor de hidrogênio e de pré-aquecimento.

- Tensões residuais externas e internas: pode ser minimizado por meio de medidas que podem ser tomadas no projeto, como por exemplo, a seleção adequada da disposição das soldas e da sequência de montagem das estruturas. Na execução da soldagem, a adoção de sequências especiais de deposição e os cuidados para que não ocorram mordeduras, reforço excessivo e falta de penetração na raiz ajudam a minimizar o nível de tensões e diminuem as chances de ocorrência de fissuração.

Resumidamente, a fissuração pelo hidrogênio pode ser minimizada ao selecionar um material que seja menos sensível a sua presença, reduzir o nível de tensões, selecionar o processo de soldagem e ao controlar a velocidade de resfriamento. A Figura 16 ilustra o aspecto macrográfico (a) e micrográfico (b) de trincas por hidrogênio.

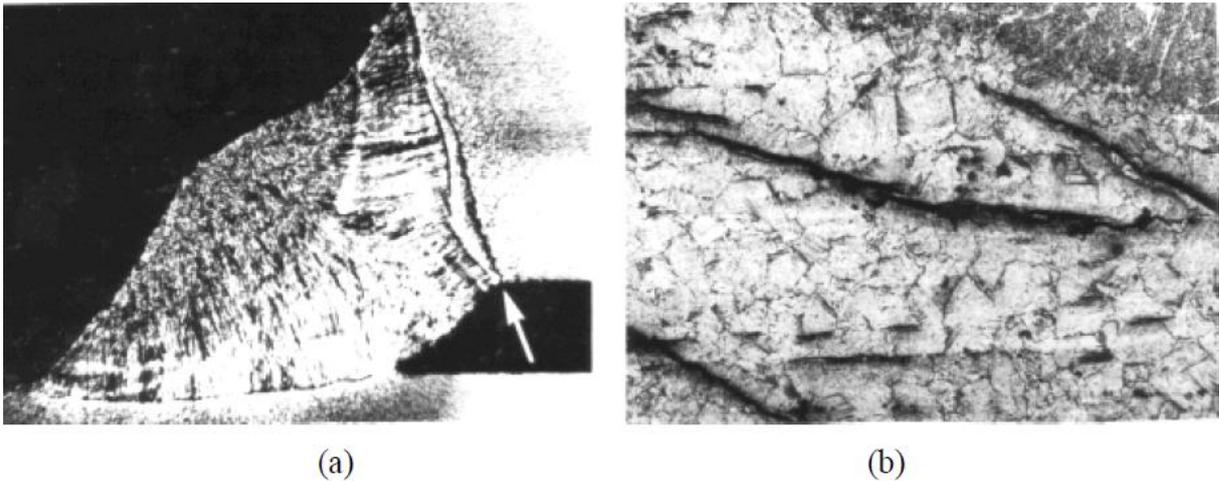


Figura 16: Trincas de hidrogênio. (a) Aspecto macrográfico (b) Aspecto micrográfico. Ataque Nital. Aumento 100X.

Fonte: Modenesi *et al.* (2006).

2.3.4 Influência dos Gases de Proteção

O gás de proteção pode influenciar a processo de soldagem GMAW de várias formas. A Figura 17 mostra que o gás influencia o ambiente de soldagem, a proteção do material fundido contra a atmosfera, o tipo de transferência metálica, a estabilidade do arco elétrico, a aparência do cordão, a geometria do cordão, além das propriedades metalúrgicas e mecânicas do metal de solda.

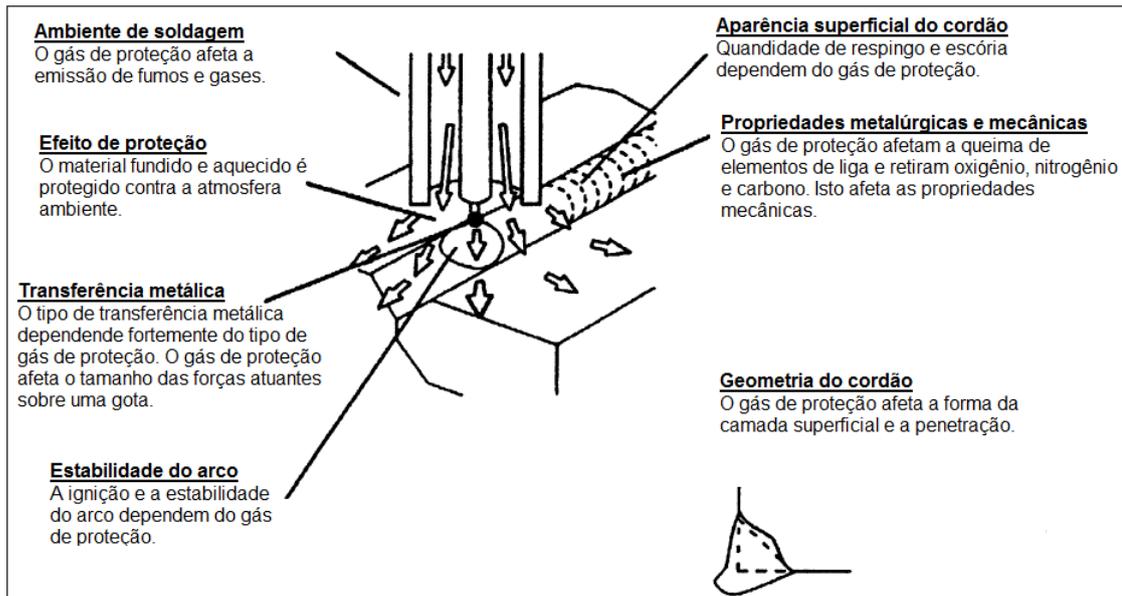


Figura 17: Influência do gás de proteção no processo de soldagem GMAW.

Fonte: adaptado de Suban e Tusek (2001).

As gotas transferidas para o metal de base são influenciadas pelos níveis de energia do arco elétrico e afetam o perfil de penetração no metal de base. A Figura 18 ilustra os aspectos das gotas e o padrão de penetração de acordo com os gases de proteção utilizados no processo de soldagem GMAW. Ao utilizar argônio puro como gás de proteção, as gotas são transferidas no metal de base em uma região com menos energia devido a sua baixa condutividade térmica e por isso ficam mais concentradas. A medida que o hélio, com alta condutividade térmica, é adicionado e a sua concentração aumenta, o arco elétrico “espalha” as gotas transferidas. No caso do CO_2 , os níveis de energia elevados dos processos de dissociação e recombinação molecular também elevam a temperatura do arco, “espalhando” ainda mais as gotas depositadas.

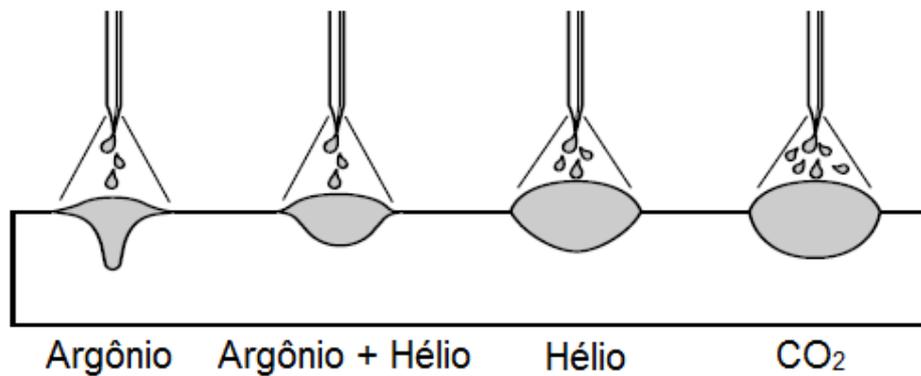


Figura 18: Aspectos das gotas e o padrão de penetração para diferentes gases de proteção.

Fonte: Lincoln Electric Company (2015).

A Figura 19 mostra as diferenças em penetração em função do gás de proteção. O argônio proporciona um arco de soldagem constrito com penetração profunda sob o arco elétrico e pouca penetração nas regiões adjacentes. A adição de O_2 nesse gás melhora ligeiramente o aspecto da penetração no metal de base. No entanto, a adição de CO_2 ao argônio melhora ainda mais esse aspecto. A medida que a sua concentração aumenta, a penetração sob o arco diminui e nas regiões adjacentes se eleva. O uso de CO_2 puro ocasiona um cordão relativamente profundo em toda área abrangida sob o arco elétrico.

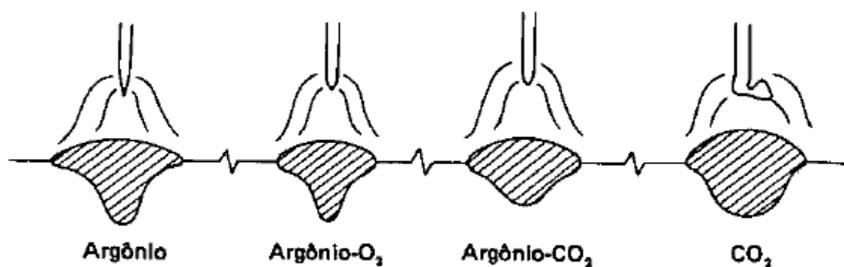


Figura 19: Diferenças em penetração, em função do gás de proteção.

Fonte: Okumura e Taniguchi (1982).

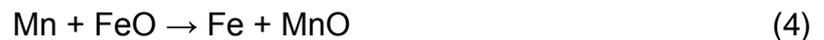
De acordo com Okumura e Taniguchi (1982), a altas temperaturas, o CO_2 se decompõe CO e O_2 conforme a Reação 1.



Devido à atmosfera altamente oxidante, o metal fundido tende a ser oxidado, formando FeO que se combina com o carbono do aço para formar CO (monóxido de carbono) conforme a Reação 2.



Como a solidificação do metal de solda é muito rápida, o CO pode ficar preso no interior do material e ocasionar porosidade. Para atenuar este efeito, arames com alto teor de desoxidantes, como silício (Si) e manganês (Mn), reagem com o FeO conforme as Reações 3 e 4. Esses elementos impedem a formação do CO, diminuindo a porosidade.



A soldagem com o gás de proteção CO₂ puro gera muitos respingos devido as suas influências no arco elétrico. A Figura 20 mostra os efeitos que o argônio exerce no arco elétrico quando é misturado com o CO₂. A medida que mais argônio é adicionado no CO₂, há um aumento da frequência de transferência das gotas e redução da frequência dos curtos-circuitos entre as gotas e a poça de fusão. Ou seja, o aumento da quantidade de argônio melhora a estabilidade do arco elétrico e gera uma quantidade mínima de respingos. Quando a porcentagem de argônio chega a 85%, o tipo de transferência metálica é goticular.

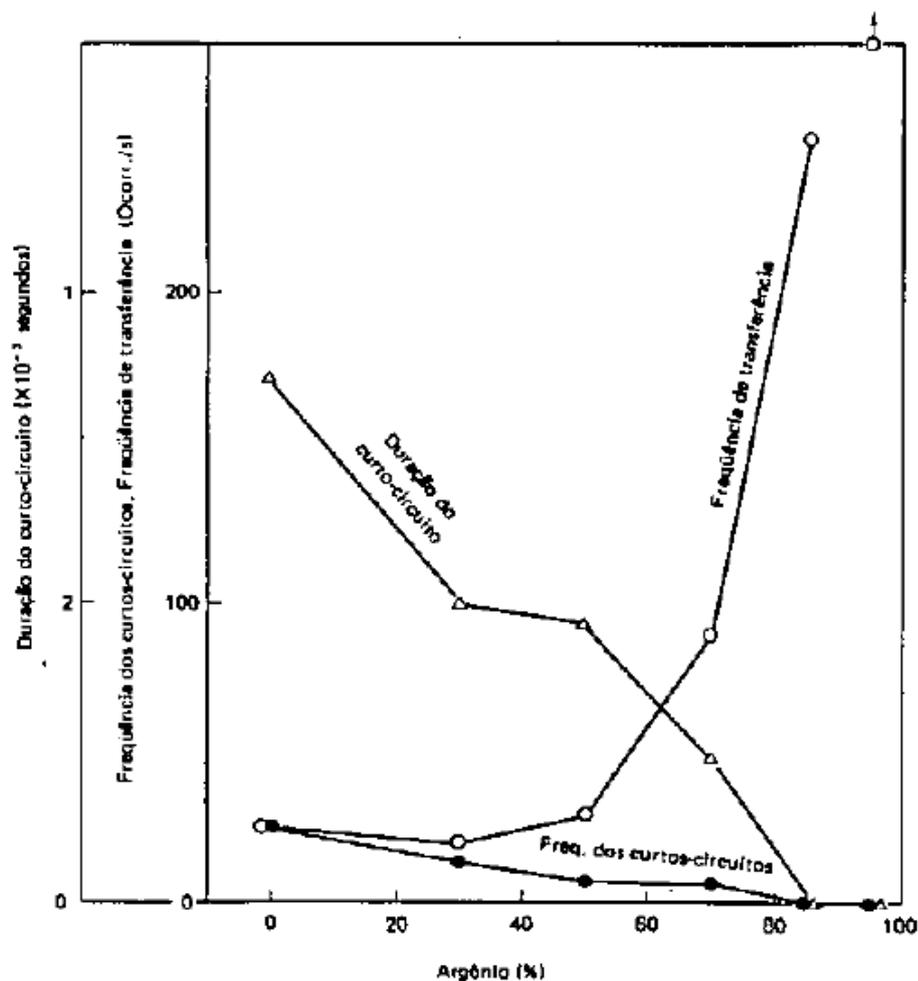


Figura 20: Os efeitos da adição do argônio ao gás de proteção CO₂.

Fonte: Okumura e Taniguchi (1982).

2.5 ESTABILIDADE DO PROCESSO

Ponomarev e Scotti (2008) evidenciam que a estabilidade de um processo de soldagem pode ocasionar diversos problemas na produção, como a formação de descontinuidades na solda, maior nível de respingos e fumos, ou ainda, irregularidades geométricas do cordão. Portanto, a estabilidade de um processo de soldagem é garantida ao manter um padrão de repetitividade (não necessariamente otimizado em relação à produção ou custo), aliada a uma boa aparência operacional (ruído e respingos reduzidos; bom acabamento do cordão).

Hermans e Ouden (1999) afirmam que resultados de experimentos de soldagem GMAW, com modo de transferência por curto-circuito, indicam uma relação direta entre a estabilidade do processo e a oscilação da poça de fusão. A

estabilidade é máxima quando a frequência do curto-circuito se iguala à frequência de oscilação da poça de fusão. Sob essas condições, há um contato regular da gota na poça de fusão e que ocasiona alta estabilidade do processo de soldagem.

De acordo com Adolfsson *et al.* (1999), a máxima estabilidade do processo, capaz de garantir qualidade à solda, ocorre quando:

- Há maior quantidade de curtos-circuitos por segundo;
- Tem-se um desvio padrão mínimo dos tempos dos curtos-circuitos;
- A transferência de massa é mínima durante o curto-circuito;
- O nível de respingos é mínimo.

No ambiente industrial, o próprio soldador avalia a estabilidade do processo pelo nível de ruído. Esta técnica empírica é importante, já que os ruídos são gerados a partir de perturbações sonoras quando há alterações de uma dada condição. Os níveis de ruído refletem modificações no modo de transferência metálica ou do comportamento do arco (Ponomarev e Scotti, 2008).

2.4.1 Indicadores de Estabilidade do Processo

2.4.1.1 Sinais do Arco Elétrico

Souza *et al.* (2011) reúne alguns índices de estabilidade utilizados por outros autores para mensurar a estabilidade do processo no modo de transferência por curto-circuito. Esses índices estão organizados no Quadro 4.

Quadro 4: Índices para mensurar a estabilidade do processo no modo de transferência por curto-circuito.

Índices	Referências Bibliográficas
Análise estatística dos sinais dos parâmetros de soldagem.	Norrish (1992)
Desvio-padrão dos picos de corrente, do período de transferência e de tempo de curto-circuito.	Baixo e Dutra (1995)
Variação do período de transferência (T), o tempo médio de duração de um curto circuito (tcc), o fator de curto-circuito ($F_{cc} = tcc/T$) e um fator de respingos (R).	Fonseca <i>et al.</i> (1996)
Histograma de períodos de transferência para diferentes valores de tensão.	Silva <i>et al.</i> (1994)
Gráfico com aspecto de laços.	Suban e Tusek (2003)
Gráfico de laços gerados a partir de gráficos de tensão em função da corrente.	Roca <i>et al.</i> (2005)
Sinal de emissão acústica.	Roca <i>et al.</i> (2007)
Captação dos respingos relacionados com os sinais elétricos adquiridos.	Kang e Rhee (2001)

Fonte: adaptado de Souza *et al.* (2011).

2.4.1.1.1 Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV_{cc})

Souza *et al.* (2011) destaca outro índice de regularidade, o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV_{cc}). Segundo este índice, há uma relação entre a estabilidade do processo e a frequência dos tempos em curto-circuito e em arco aberto. Se esses tempos sofrem pouca variação, o processo está estável. Numa comparação, quanto menor o valor do índice de regularidade, mais estável é o arco elétrico. O IV_{cc} é encontrado a partir da Equação 3.

$$IV_{CC} = \frac{\sigma_{t_{cc}}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{t_{ab}}}{t_{ab}} \quad (3)$$

Onde:

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

$\sigma_{t_{ab}}$ = desvio padrão da média do tempo de arco aberto;

t_{cc} = média do tempo de curto-circuito;

t_{ab} = média do tempo de arco aberto.

2.4.1.2 Respingos

A geração de respingos é um fator que influencia na qualidade e na produtividade final da solda (Dantas e Costa, 2004). Santos e Scotti (2009) concluem que a geração de respingos é um indicador de produtividade dos processos de soldagem e é inconveniente quando os seguintes aspectos são analisados:

- Desperdício do material fundido que não é depositado na região de solda;
- Respingos aderidos à parede do bocal, dificultando a passagem do gás de proteção;
- Custo de mão-de-obra adicional para remoção do material aderido à chapa e para a limpeza do bocal da tocha.

O modo de transferência por curto-circuito tem características periódicas de arco e curto-circuito entre o arame e a poça de fusão. A gota de metal cresce na ponta do eletrodo quando o arco é mantido e assim acontece a transferência. Formas de onda irregulares de corrente e tensão indicam variações nos tamanhos dessas gotas e ocasionam um desequilíbrio nas forças que as regem. A geração de respingos é maior quando o tempo de curto-circuito ou tempo de arco é irregular (Kang *et al.*, 2003).

O fluxo do gás de proteção é direcionado através do bocal da tocha de soldagem. Se o bocal estiver obstruído por excesso de respingos ou com a ponta danificada, não há garantia de um fluxo de gás uniforme, o que pode ocasionar porosidade e dificuldade de operação (Ponomarev e Scotti, 2008). A Figura 21 ilustra a obstrução do bocal em consequência do excesso de respingos.

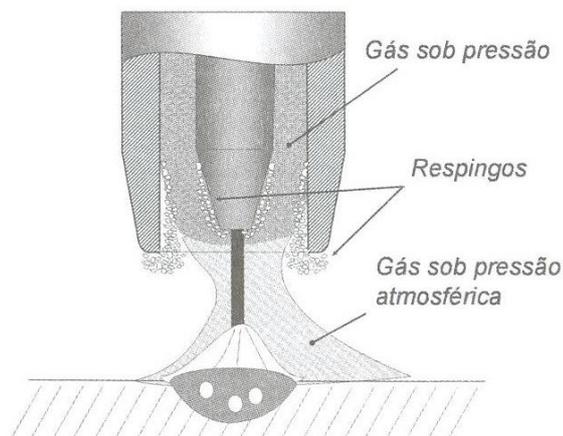


Figura 21: Obstrução do bocal por excesso de respingos.

Fonte: Ponomarev e Scotti (2008).

A respeito da coleta de respingos, não foi possível encontrar um método padronizado para coletar os respingos de forma eficiente. Kang *et al.* (2003) propõem uma caixa que envolve toda a tocha e peça durante o seu deslocamento. No entanto, este método influencia o resultado porque a pressão do gás é alterada e respingos podem atingir as paredes da caixa e cair na poça de fusão. Já Fernandes *et al.* (2010) utilizam um coletor de respingos formado por uma caixa coletora e uma espécie de “coifa” que envolve tocha e peça a soldar, sendo capaz de quantificar os respingos e saber de forma detalhada seu alcance, forma e massa.

2.4.2 Aquisição e Análise de Sinais do Arco Elétrico

O uso de técnicas para monitorar e analisar os sinais elétricos ou de luminosidade do arco permite uma avaliação criteriosa da estabilidade do processo, tornando a avaliação cada vez mais diagnosticável ao completá-la com técnicas estatísticas e de visualização do arco (Ponomarev e Scotti, 2008). Resende (2007) destaca a análise de oscilogramas de tensão e de corrente em laboratório por meio de programas de computador, permitindo que a análise seja mais precisa. Os programas possibilitam também a análise estatística desses sinais de corrente e tensão do arco.

2.4.3 Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem

De acordo com a IMC - Soldagem (2005), o Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem SAPV4 é uma ferramenta para análise do processo de soldagem. O equipamento é constituído por uma maleta com sensores capazes de medir variáveis que tem interface com o software de aquisição dos sinais, acessado por meio de notebook. A seguir são listadas as funcionalidades do sistema:

- a) Leitura instantânea de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás;
- b) Exibição das informações médias por meio de tabelas com dados brutos ou tratados por cordão de solda;
- c) Sobreposição das grandezas;
- d) Visualização da regularidade da transferência metálica por meio de histogramas;
- e) Geração do gráfico I (corrente) x U (tensão) de soldagem;
- f) Exibição, através do mostrador digital, das variáveis citadas acima além de outras, tais como quantidade de arame e gás consumidos, tempo de soldagem e potência.

A Figura 22 mostra os sinais instantâneos de tensão, vazão do gás, corrente e velocidade de arame adquiridos por meio do sistema SAPV4.

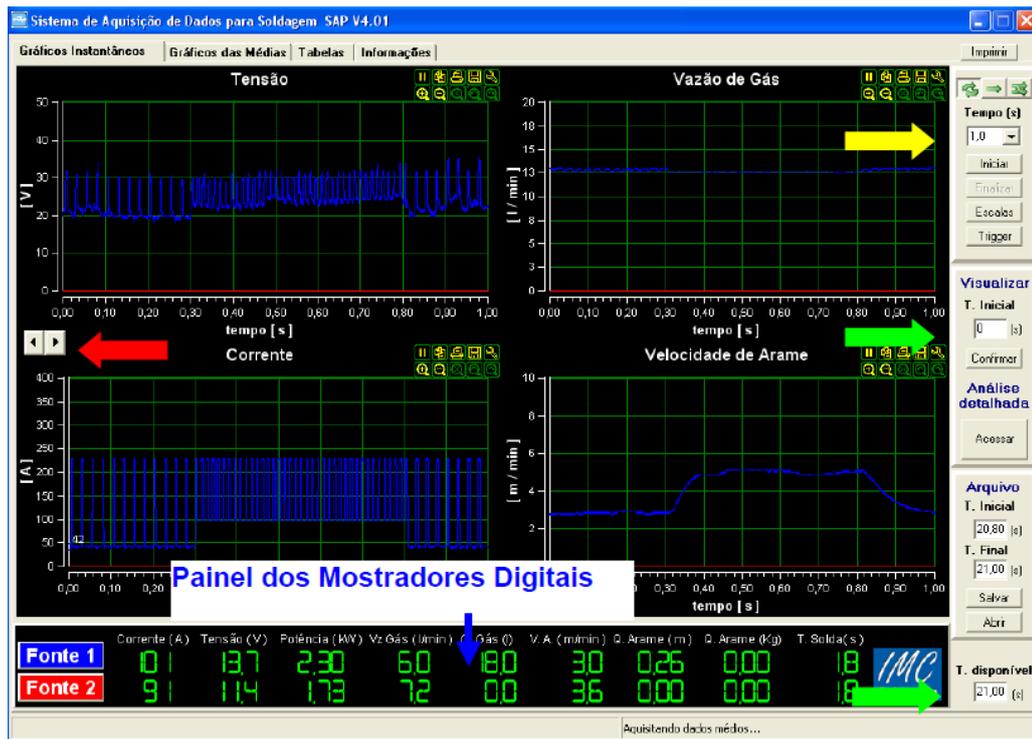


Figura 22: Tela de visualização dos sinais instantâneos.

Fonte: IMC Soldagem (2005).

O Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem SAPV4 realiza a leitura instantânea da corrente e da tensão. A partir da leitura desses valores feita por sensores, calculam-se determinados índices para avaliação da regularidade de transferência metálica. A Figura 23 mostra um oscilograma de corrente na soldagem por curto-circuito que apresenta os picos de corrente (I_p), derivadas de subida (Ds) e derivadas de descida (Dd).

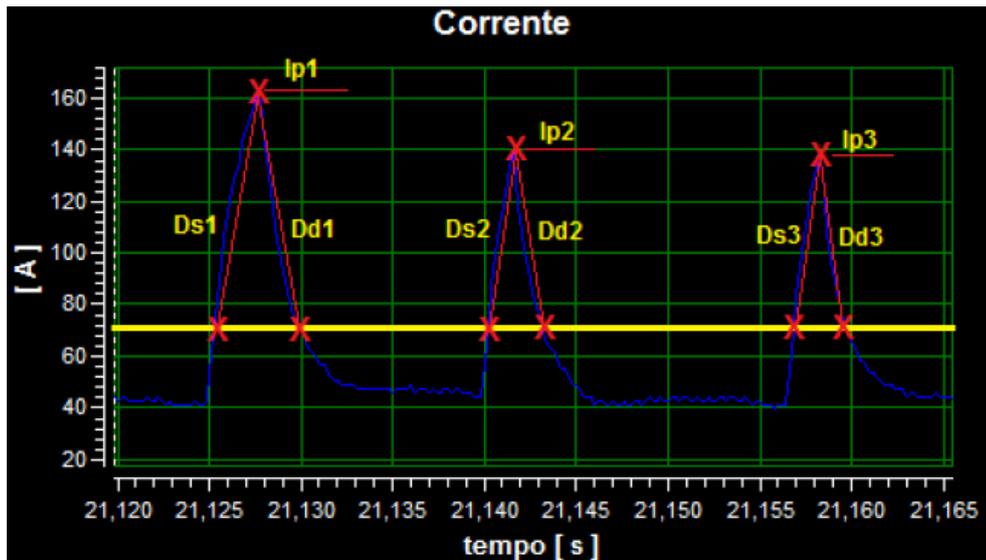


Figura 23: Oscilograma de corrente na soldagem por curto-circuito.

Fonte: IMC Soldagem (2014).

A Figura 24 mostra um oscilograma de tensão na soldagem por curto-circuito que apresenta os picos de tensão (U_p), períodos de transferência (T), períodos de arco aberto (T_a) e períodos de curto circuito (T_c).

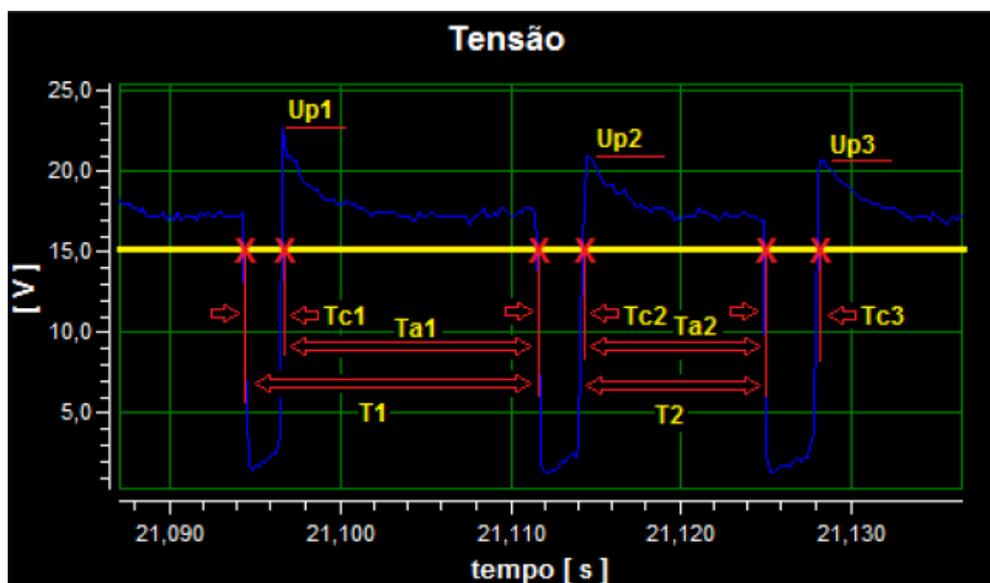


Figura 24: Oscilograma de tensão na soldagem por curto-circuito.

Fonte: IMC Soldagem (2014).

Devido ao número expressivo de dados, o SAPV4 é capaz de realizar o tratamento estatístico dos valores registrados. A Figura 25 mostra o resumo

estatístico de dados captados de Picos de Corrente, Picos de Tensão, Período, Período de Arco Aberto, Período de Curto Circuito, Derivada Subida e Derivada Descida, onde: Total é soma de todos os eventos; Média é a soma dos valores das variáveis dividida pelo número de eventos; D.P. é desvio padrão em relação ao valor da média; D.R. é o desvio relativo em relação à média.

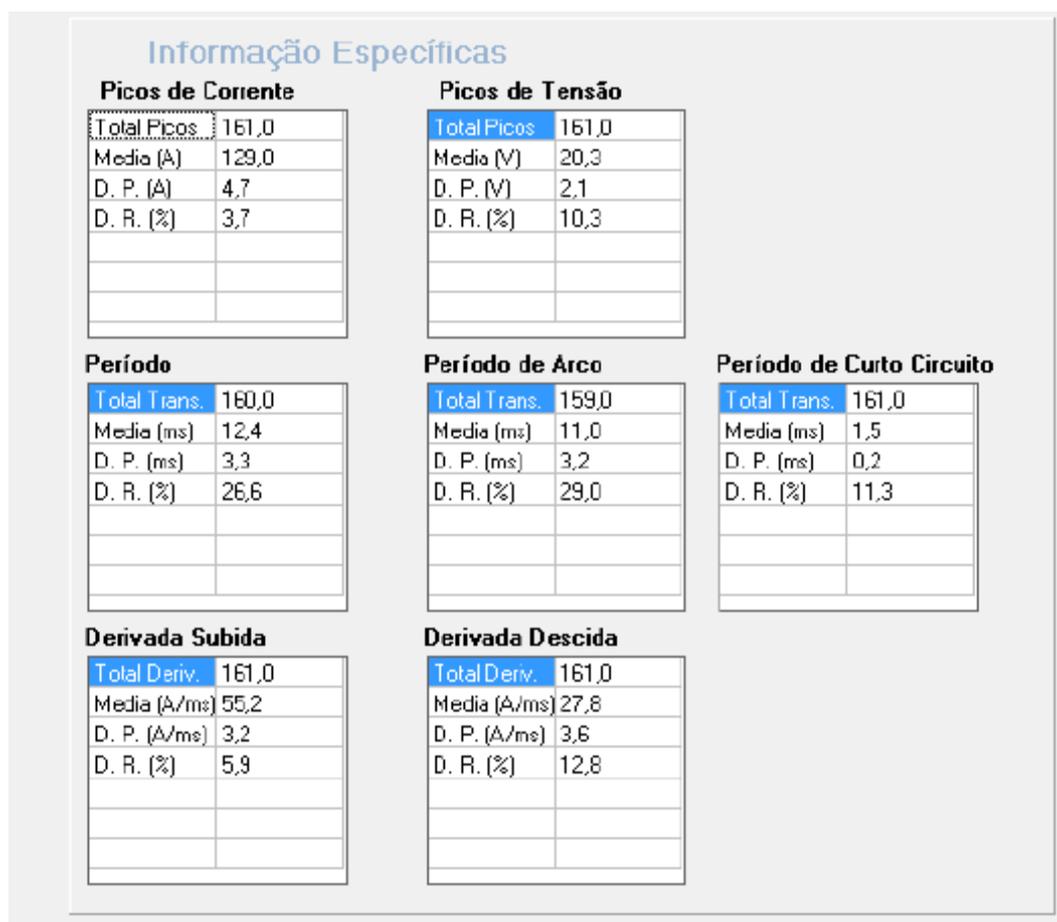


Figura 25: Resumo estatístico dos sinais captados.

Fonte: IMC Soldagem (2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os seguintes materiais foram utilizados na soldagem das chapas de teste:

- 32 chapas de aço carbono SAE 1020 numeradas. Dimensões: 6,35mm x 250mm x 31,75mm;
- Arame com 1,2 mm de diâmetro. Especificação: AWS ER 70S-6. A composição do arame está descrita na Tabela 2.

Tabela 2: Requisitos de composição química para o arame (% em peso).

Classificação	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)	Cu (%)
ER 70S-6	0,06	1,4	0,80							
	-	-	-	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50
	0,15	1,8	1,15							

* Os valores únicos são valores máximos.

Fonte: adaptado de Bracarense *et al.* (2007).

- Lixas com granulometrias 180, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh;
- 2% e 5% de Solução Nital (ácido nítrico + álcool etílico);
- Escova de aço;
- Picadeira com mola;
- Gases armazenados em cilindros para fornecimento dos gases convencionais e para produção dos gases de proteção com hidrogênio: Argônio + 25%CO₂, CO₂ e H₂.

3.2 EQUIPAMENTOS

Os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Máquina de solda SOLMIG 403-CV NAVY. Fabricante e propriedade: White Martins;
- Equipamento para mecanização da soldagem. Propriedade: White Martins;
- Misturador de Gás para Soldagem. Propriedade: White Martins;

- Sistema de aquisição de dados SAPV4. Fabricante: IMC Soldagem. Propriedade: UENF;
- Coletor de respingos composto por “coifa” e bandeja. Propriedade: UENF;
- Mesa de soldagem com suporte para alinhamento das chapas de teste. Propriedade: White Martins;
- Microdurômetro HMV-2. Fabricante: Shimadzu do Brasil. Propriedade: UENF;
- Microscópio Neophot-32. Propriedade: UENF;
- Balança de precisão BEL Engineering Mark2100. Resolução: 0,01g;
- Paquímetro Mitutoyo. Resolução: 0,05mm.

3.3 METODOLOGIA

As etapas da pesquisa estão ilustradas no fluxograma da Figura 26. A metodologia proposta será detalhada no decorrer desse capítulo.

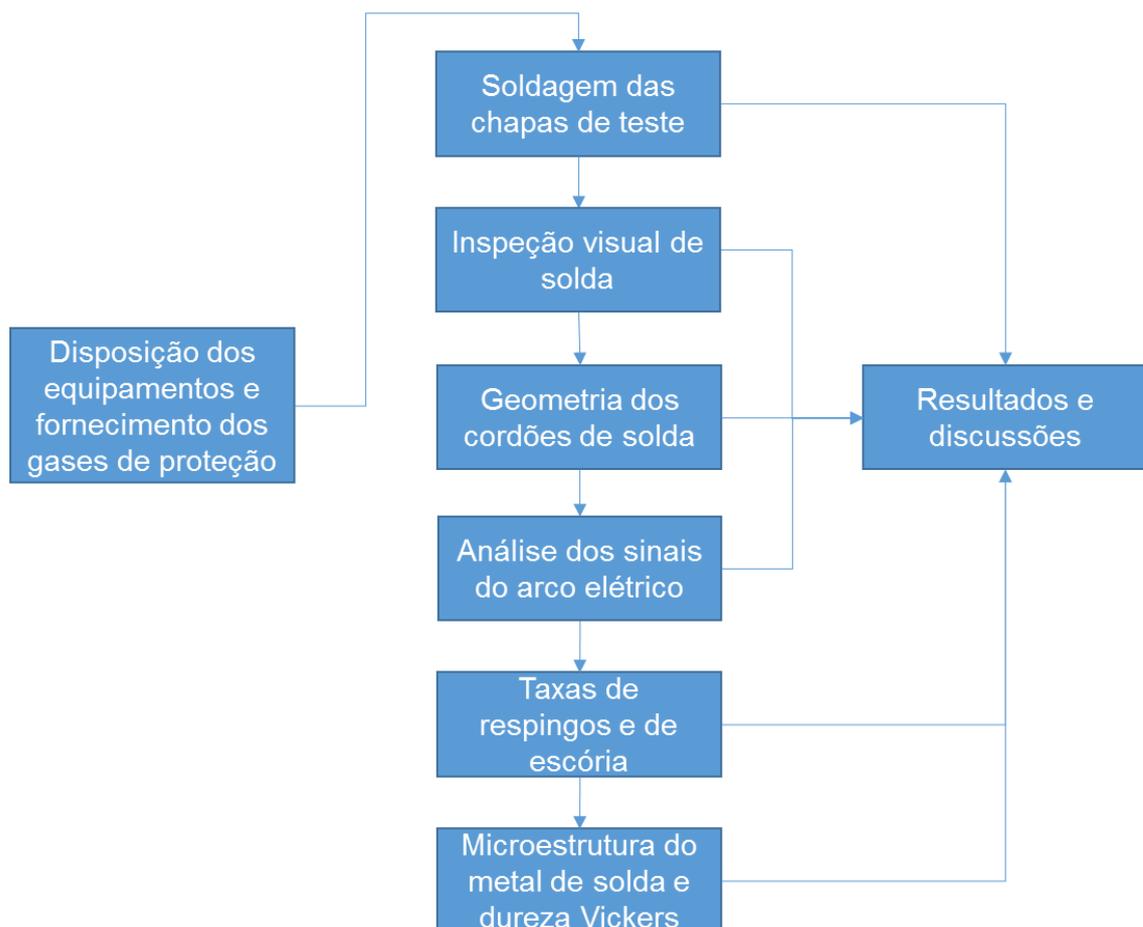


Figura 26: Fluxograma com as etapas de execução da metodologia.

3.3.1 Disposição dos equipamentos e fornecimento dos gases de proteção

A Figura 27 mostra a disposição dos equipamentos do Laboratório de Soldagem do Centro de Tecnologia Rio da White Martins que foram utilizados no experimento, sendo eles:

- Máquina de solda SOLMIG 403-CV NAVY da White Martins (1);
- Sistema de aquisição de dados - SAPV4 (2);
- Posicionador para a mecanização da tocha de soldagem (3);
- Misturador de gás de soldagem (4);
- Cilindros com os gases: Argônio + 25% CO₂, CO₂ e H₂ (5);
- Coletor de respingos (6);
- Mesa de soldagem com suporte para o alinhamento das chapas de teste (7).



Figura 27: a) Disposição dos equipamentos. b) Misturador de gases e cilindros utilizados. c) mesa de soldagem e coletor de respingos.

O SAPV4 foi utilizado para capturar os valores de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame através de acessórios conectados ao painel de

conexões (Figura 28-a). Esses acessórios foram acoplados à máquina de solda conforme a Figura 28-b.



Figura 28: a) Painel de conexões do SAPV4 e respectivos dispositivos. b) Dispositivos do SAPV4 acoplados à máquina de solda.

A Tabela 3 mostra as faixas de medição, resolução e a incerteza dos dados captados pelo SAPV4.

Tabela 3: Faixas de medição, resolução e a incerteza dos dados que serão captados pelo SAPV4.

Variável	Faixa	Resolução	Incerteza
Corrente	-600 a 600 A	0,8 A	2%
Tensão	-100,0 a 100,0 V	0,1 V	1%
Velocidade do Arame	0 a 25,0 m/min	0.1 m/min	2%
Taxa de Amostragem dos Sinais Instantâneos	5000	Hz	0,1 %

Fonte: adaptado de IMC Soldagem (2014).

Os gases de proteção Argônio + 25%CO₂ e CO₂, por serem comerciais, estavam reservados em cilindros para serem fornecidos diretamente para a máquina de solda. O misturador de gás para soldagem (Figura 29-a) e seu programa de computador ROTO_BR foram utilizados para acrescentar 2% de hidrogênio no gás Argônio + 25%CO₂ e 4% de hidrogênio no gás CO₂ para que as novas misturas fossem fornecidas para a máquina de solda. A Figura 29-b mostra a Pasta de Cálculo do programa ROTO_BR que forneceu resultados confiáveis com uma incerteza de 10% (Lobato e Neto, 2003). Os gases utilizados tiveram a nomenclatura adotada conforme o Quadro 5.

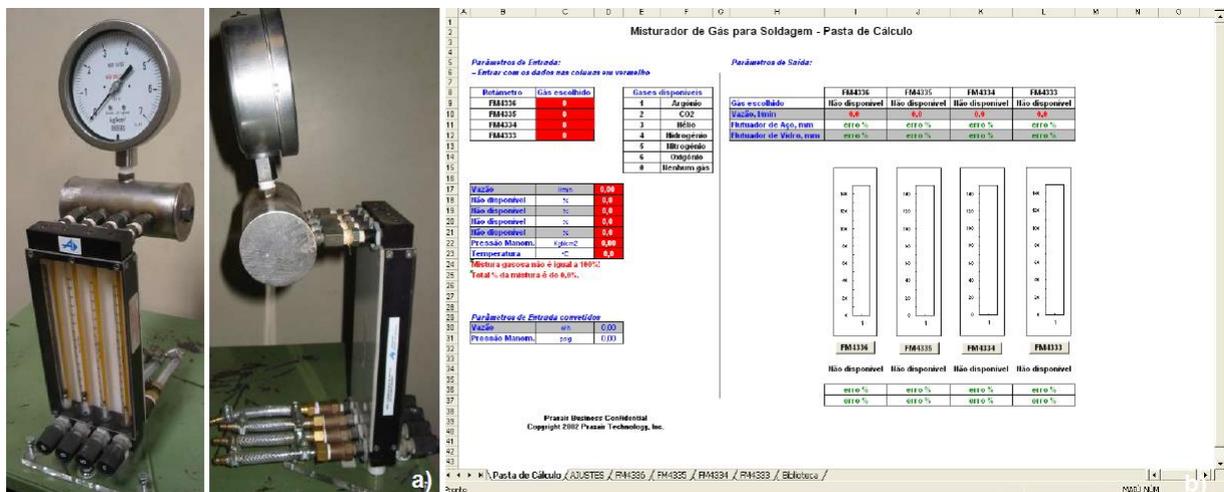


Figura 29: a) Misturador de gás para soldagem. b) Visualização da Pasta de Cálculo do programa ROTO_BR. Fonte: Lobato e Neto (2003).

Quadro 5: Composição do gás e nomenclatura adotada.

Composição do gás	Nomenclatura
75% de Argônio + 25% de CO ₂	Ar+25%CO ₂
75% de Argônio + 25% de CO ₂ (98% do gás) + 2% de H ₂	Ar+25%CO ₂ +2%H ₂
100% de CO ₂	CO ₂
96% de CO ₂ + 4% de H ₂	CO ₂ +4%H ₂

3.3.2 Soldagem das chapas de teste

Oito chapas de aço com dimensões 250 x 31,75 x 6,35 mm foram utilizadas em cada um dos quatro tipos de gás de proteção. Um cordão de solda foi depositado por chapa. Os seguintes parâmetros foram mantidos constantes durante os

experimentos: arame ER 70S-6 de 1,2 mm; distância do bico de contato à peça (DBCP) foi de 15 mm; vazão do gás em 15 l/min; velocidade de soldagem em 300 mm/min; ângulo da tocha de 90° em relação à face da solda.

Os parâmetros de soldagem tensão e velocidade de alimentação do arame (diretamente proporcional à corrente de soldagem) foram ajustados para os gases convencionais de acordo com a experiência do soldador numa faixa de 20 a 22 volts e de 210 a 250 amperes. Os parâmetros do gás de proteção com hidrogênio foram os mesmos do respectivo gás convencional. O tempo de soldagem foi de 40 a 45 segundos. Durante a soldagem, os valores de tensão e corrente foram anotados para comparar com os valores médios retirados da tabela de informações tratadas pelo SAPV4. Devido à grande variação dos sinais elétricos no início e no fim do arco elétrico, os dados foram captados no intervalo de 10 a 35 segundos. A Equação 4 foi utilizada para calcular a energia de soldagem.

$$ES = (V \times I \times 0,75) / VS \quad (4)$$

Onde:

ES = Energia de soldagem (J/mm)

V = Tensão (V)

I = Corrente (A)

0,75 = Rendimento do processo GMAW

VS = Velocidade de soldagem (m/min)

3.3.3 Inspeção visual de solda

Durante a soldagem foram observados a geração de respingos, fumos e nível de ruído. Após a soldagem, as chapas de teste foram observadas para avaliação da aparência do cordão, da quantidade de escória e de respingos aderidos. Os corpos de prova foram fotografados para registrar as observações. As chapas foram escovadas para a realização da inspeção visual para avaliar a presença de descontinuidades superficiais. As chapas também foram fotografadas após a limpeza.

3.3.4 Geometria dos cordões de solda

A avaliação geométrica dos cordões de solda foi feita através de análise metalográfica de duas seções transversais de cinco corpos de prova para cada gás de proteção. Essas amostras de 40 milímetros de comprimento foram retiradas do centro das chapas. As superfícies das seções transversais foram lixadas com lixas de granulometrias 180, 220, 320, 400 e 600 mesh. O ataque químico foi feito com uma solução de Nital com concentração de 5%. Essa análise teve como objetivo identificar penetração (P), reforço (R) e largura (L) dos cordões conforme a Figura 30. As seções transversais foram fotografadas.

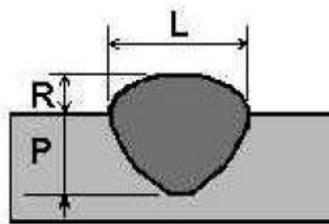


Figura 30: Parâmetros geométricos de solda. (P) Penetração; (R) Reforço; (L) Largura.

Fonte: adaptado de Silva e Scotti (2002).

As medições foram feitas com o auxílio de um paquímetro. As medidas de reforço e largura foram utilizadas para o cálculo do índice de convexidade conforme a Equação 5. De acordo com Silva (2000), cordões com IC próximos de 30% são considerados adequados por apresentarem uma boa convexidade.

$$IC = (R/L) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

R: reforço (mm);

L: largura (mm);

IC: Índice de convexidade (%);

3.3.5 Análise dos sinais do arco elétrico

O Sistema de aquisição de dados SAPV4 realizou a leitura instantânea e dos valores médios das grandezas corrente, tensão e velocidade de arame a cada 0,2 segundos para cada cordão de solda depositado. A captação dos dados foi considerada no intervalo de 10 a 35 segundos. Os seguintes dados foram retirados da leitura instantânea:

- Média e desvio-padrão dos picos de corrente;
- Média e desvio-padrão dos períodos de arco aberto;
- Média e desvio-padrão dos períodos de curto-circuito;
- Média e desvio-padrão dos períodos de transferência;

Com esses valores será possível calcular os índices abaixo pelas Equações 3 (IVcc) e 6. Quanto menor o índice, menor é a variação dos valores em relação à média e mais regular é a transferência metálica, o que indica boa estabilidade do arco elétrico.

$$CV = (\sigma / t) \times 100 \quad (6)$$

Onde:

σ = desvio padrão da média;

t = média;

CV = coeficiente de variação (%).

- Coeficiente de variação dos picos de corrente (CVPC);
- Coeficiente de variação do período de arco aberto (CVAA);
- Coeficiente de variação do período de curto-circuito (CVCC);
- Coeficiente de variação do período de transferência (CVT);
- Índice de Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IVcc).

A comparação entre duas médias pode ser equivocada, e por isso, o teste *t* de *student*, por meio do *software* BioEstat 5.0, será utilizado para comparar duas médias com confiabilidade estatística de 0,05. O. Caso o valor de *p* (bilateral) calculado seja menor do que 0.05, não há diferença significativa entre as médias. Caso o valor de *p* (bilateral) seja menor do que 0,05, há diferença significativa entre as médias (Ayres *et al.*, 2007).

3.3.6 Taxas de respingos e de escória

Após a soldagem de cada corpo de prova, os respingos e a escória que ficaram nas chapas foram armazenados em potes plásticos. Após a soldagem do último corpo de prova de cada gás, o bocal da tocha foi limpo e os respingos retidos foram colocados no coletor de respingos. Depois, todos os respingos armazenados no coletor foram recolhidos e armazenados em postes plásticos. A escória foi separada dos respingos com o auxílio de um ímã. Este procedimento foi adotado para acumular mais respingos e escória para facilitar a pesagem e a comparação. Tanto os respingos quanto a escória foram pesados com uma balança eletrônica de precisão com resolução de 0,01g.

A quantidade de respingos (*Qres*) é a soma da massa dos respingos do coletor com a massa dos respingos aderidos às chapas. Os tempos de soldagem das oito chapas de cada gás foram somados (ΣTS). A Equação 6 foi utilizada para calcular a taxa de respingos (*Tres*), definida como a quantidade de respingos por unidade de tempo.

$$Tres = Qres (g) / \Sigma TS (s) \quad (6)$$

A Equação 7 foi utilizada para calcular a taxa de escória (*Tesc*), definida como quantidade de escória (*Qesc*) por unidade de tempo (ΣTS).

$$Tesc = Qesc (g) / \Sigma TS (s) \quad (7)$$

3.3.7 Microestrutura do metal de solda e dureza Vickers

A avaliação da microestrutura do metal de solda e a dureza Vickers foram realizadas em uma amostra para cada tipo de gás de proteção. As amostras foram lixadas até 1200 mesh e polidas com pasta de alumina de granulometria 1 μ m. Depois, foram polidas manualmente com pasta de alumina de 0,3 μ m e depois com 0,05 μ m. O ataque químico foi feito com uma solução de Nital com concentração de 2%. As amostras foram observadas e fotografadas pelo Microscópio Neophot-32. Os tipos de microestrutura que poderão ser encontrados no metal de solda de aços ferríticos estão listados no Quadro 6.

Quadro 6: Principais microestruturas do metal de solda de aços ferríticos.

Microconstituintes		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 Perdígão (1987).

As mesmas amostras foram utilizadas para medir a dureza Vickers. Devido à adição de hidrogênio no gás de proteção, este ensaio teve como objetivo verificar, juntamente com a caracterização da microestrutura do metal de solda, se a região analisada apresentou dureza elevada que pode favorecer a ocorrência da fissuração pelo hidrogênio. Os valores foram obtidos pelo microdurômetro com carga de impressão de 0,05 kgf/mm² em 18 pontos, numa linha reta localizada a 1,5 mm de distância da superfície em que os cordões de solda foram depositados, compreendendo as seguintes regiões: metal de base, zona termicamente afetada e zona fundida. Os valores máximos de dureza Vickers deverão estar abaixo de 250 HV para que não haja risco de fissuração devido à presença do hidrogênio (NACE International, 2015). A Figura 31 mostra a localização dos pontos onde foram realizadas as medições de dureza Vickers.

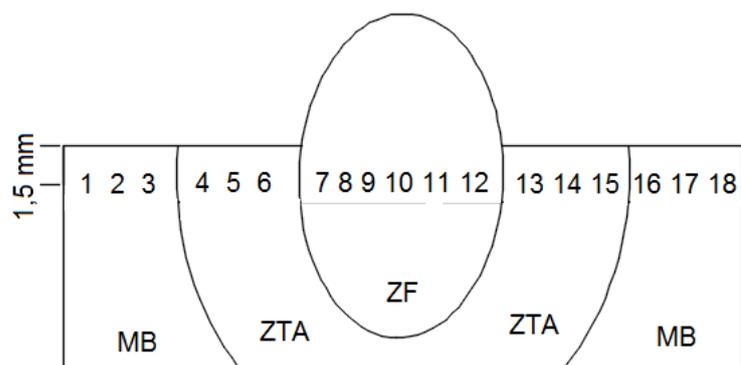


Figura 31: Localização dos pontos onde serão realizadas as medidas de dureza Vickers.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Soldagem das chapas de teste

A soldagem das chapas foi realizada para os quatro gases de proteção com os parâmetros previstos na metodologia. A tensão e a corrente foram ligeiramente elevadas para a soldagem com CO_2 , mantendo esse ajuste para $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$. De acordo com Ponomarev e Scotti (2008), o CO_2 necessita de um aumento da tensão para uma melhor operação.

As Tabelas 4 e 5 mostram os valores de corrente, tensão e tempo de soldagem que foram registrados pelo SAPV4 e da energia de soldagem que foi calculada pela Equação 4. As leituras no visor da máquina de solda para corrente e tensão ficaram próximas das registradas pelo SAPV4. A observação das tabelas mostra o seguinte:

- **Ar+25%CO₂**: A corrente variou de 213,4 a 238,0 A, média de 226,8 A e desvio-padrão de 8,7 A. A tensão variou de 19,8 a 20,3 V, média de 20,1 V e desvio-padrão de 0,2 V. A energia de soldagem variou de 649,8 a 710,4 J/mm, média de 683,5 J/mm e desvio-padrão de 20,4 J/mm.

- **Ar+25%CO₂+2%H₂**: Com a adição de H_2 no gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, houve uma tendência de a corrente aumentar, variando de 214,6 a 239,4 A, média de 229,5 A e desvio-padrão de 7,7 A. A tensão também apresentou tendência de aumento, variando de 20,2 a 21,2 V, com média de 20,9 V e desvio-padrão de 0,3 V. Com maiores valores de tensão e corrente, a energia de soldagem calculada foi maior, variando de 659,9 a 746,9 J/mm com média de 718,2 J/mm e desvio-padrão de 28,1 J/mm.

- **CO₂**: Aparentemente, os valores de corrente foram os maiores registrados, variando de 217,5 a 253,1 A, com média de 231,6 A e desvio-padrão de 12,1 A. A tensão também foi maior, variando de 20,5 a 21,3 V, média de 21,0 V e desvio-padrão de 0,3 V. A energia de soldagem calculada variou de 694,9 a 778,3 J/mm, apresentando a maior média, de 729,1 J/mm, e desvio-padrão de 28,3 J/mm.

- **CO₂+4%H₂**: Com a adição de H_2 no CO_2 , houve uma tendência de menores valores de corrente, variando de 221,7 a 231,2 A, média de 226,7 A e desvio-padrão de 3,6 A. A tensão se manteve a mesma, variando de 20,9 a 21,2 V, com média de

21 V e desvio-padrão de 0,1 V. A energia de soldagem calculada foi um pouco menor, variando de 705,0 a 724,8 J/mm, média de 714,8 J/mm e desvio-padrão de 7,5 J/mm.

Tabela 4: Valores de tensão, corrente e tempo de soldagem registrados pelo SAPV4 e a energia de soldagem. Gases de proteção: Ar+25%CO₂ e Ar+25%CO₂+2%H₂.

Chapa de teste	Ar+25%CO ₂				Chapa de teste	Ar+25%CO ₂ +2%H ₂			
	Corrente (A)	Tensão (V)	Energia de soldagem (J/mm)	Tempo de Soldagem (s)		Corrente (A)	Tensão (V)	Energia de soldagem (J/mm)	Tempo de Soldagem (s)
1	224,1	20,3	682,4	45,37	9	231,7	20,2	702,1	45,55
2	230,1	20,0	690,3	44,99	10	214,6	20,5	659,9	44,44
3	236,5	19,8	702,4	43,00	11	224,3	21,2	713,3	41,66
4	213,4	20,3	649,8	44,21	12	226,9	21,1	718,1	44,73
5	225,3	20,1	679,3	44,94	13	230,3	21,1	728,9	43,34
6	216,8	20,3	660,2	44,56	14	232,2	21,0	731,4	43,50
7	238,0	19,9	710,4	43,90	15	236,6	21,0	745,3	43,03
8	229,9	20,1	693,1	44,19	16	239,4	20,8	746,9	43,16
Média	226,8	20,1	683,5	44,40	Média	229,5	20,9	718,2	43,68
DP	8,7	0,2	20,4	0,75	DP	7,7	0,3	28,1	1,20

Tabela 5: Valores de tensão, corrente e tempo de soldagem registrados pelo SAPV4. Gases de proteção: CO₂ e CO₂+4%H₂.

Chapa de teste	CO ₂				Chapa de teste	CO ₂ +4%H ₂			
	Corrente (A)	Tensão (V)	Energia de soldagem (J/mm)	Tempo de Soldagem (s)		Corrente (A)	Tensão (V)	Energia de soldagem (J/mm)	Tempo de Soldagem (s)
17	237,9	20,9	745,8	42,42	25	225,1	21,1	712,4	42,87
18	220,1	21,3	703,2	42,14	26	222,9	21,2	708,8	43,80
19	224,9	21,2	715,2	42,39	27	221,7	21,2	705,0	43,33
20	235,5	20,9	738,3	41,67	28	224,4	21,0	706,9	42,80
21	239,8	20,8	748,2	41,21	29	228,3	21,0	719,1	40,80
22	217,5	21,3	694,9	40,10	30	230,5	20,9	722,6	41,56
23	223,9	21,1	708,6	42,31	31	231,2	20,9	724,8	43,75
24	253,1	20,5	778,3	44,07	32	229,2	20,9	718,5	42,69
Média	231,6	21,0	729,1	42,04	Média	226,7	21,0	714,8	42,70
DP	12,1	0,3	28,3	1,14	DP	3,6	0,1	7,5	1,05

A análise dos oscilogramas de tensão e de corrente para os quatro tipos de gás de proteção mostra que as curvas caracterizam a transferência por curto-circuito. Na soldagem com CO₂ houve maior dificuldade em observar um período da

curva mais regular, indicando a maior instabilidade do arco elétrico. A Figura 32 mostra um exemplo de oscilogramas de tensão e corrente que foram gerados pelo SAPV4.

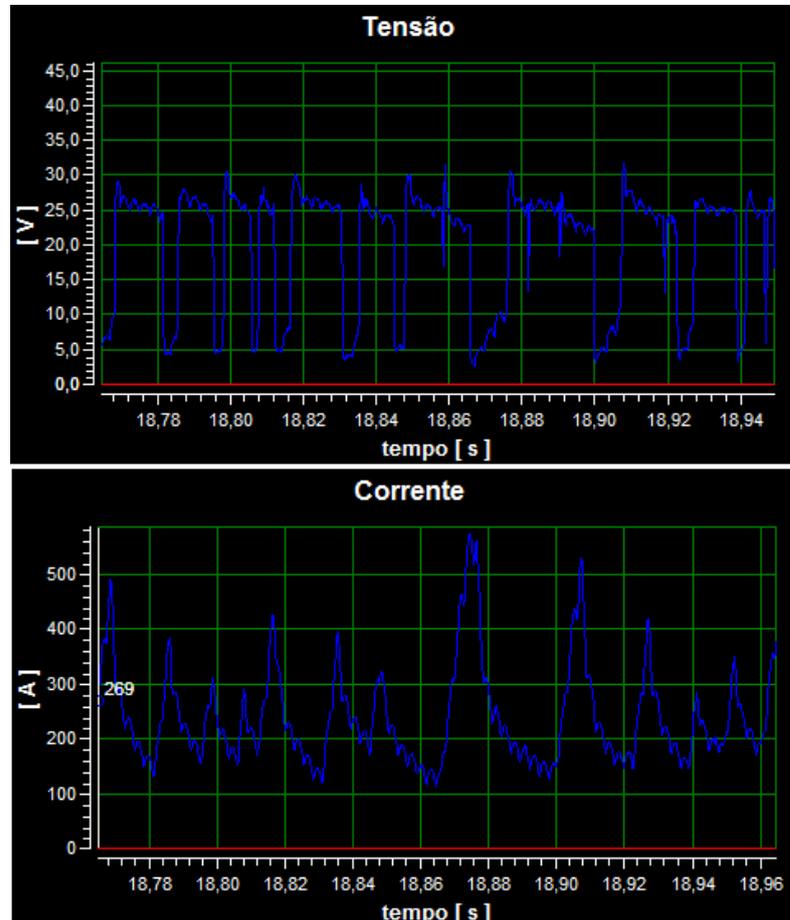


Figura 32: Oscilogramas de tensão e corrente da transferência por curto-circuito. Chapa de teste 8. Gás: Ar+25%CO₂.

Os valores de tensão, corrente e energia de soldagem apresentam pequenas variações, mas estão dentro da faixa definida na metodologia do trabalho. Além disso, o comportamento dos oscilogramas de tensão e corrente comprovam que o tipo de transferência é por curto-circuito.

4.2 Inspeção visual

O objetivo desta etapa foi realizar uma análise qualitativa de determinados aspectos da soldagem das chapas, e ainda, identificar discontinuidades superficiais

nos cordões de solda. O Quadro 7 mostra os cordões de solda depositados para os quatro gases de proteção. Essas observações mostram o seguinte:

- **CO₂**: Foi o gás que produziu a maior quantidade de respingos e fumos, com respingos difíceis de serem removidos da chapa. O ruído apresentou as explosões mais irregulares e aspecto dos cordões de solda foi o mais irregular.

- **CO₂+4%H₂**: A adição de 4% de H₂ ao CO₂ reduziu a quantidade de respingos e fumos, com respingos um pouco mais fáceis de serem removidos. O ruído apresentou explosões mais regulares, cordões de solda com aspecto um pouco melhor e quantidade de escória aparentemente igual ao gás CO₂.

- **Ar+25%CO₂**: Produziu muito menos fumos e respingos do que CO₂, com respingos muito mais fáceis de serem removidos. O ruído apresentou explosões muito mais regulares, cordões de solda com melhor aspecto e menor quantidade de escória do que com CO₂.

- **Ar+25%CO₂+2%H₂**: A adição de 2% de H₂, aparentemente, manteve todos os aspectos analisados ao comparar com o gás Ar+25%CO₂.

A análise dos aspectos qualitativos permite as seguintes comparações:

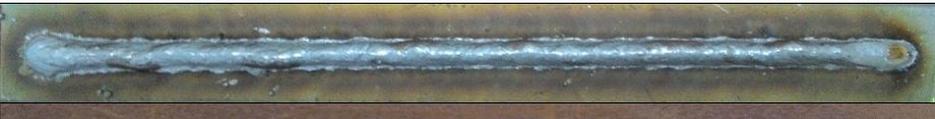
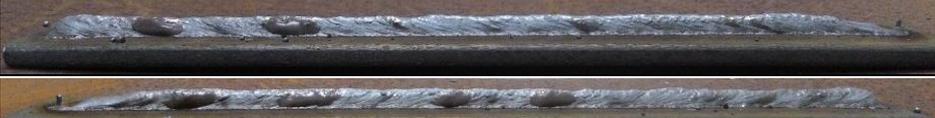
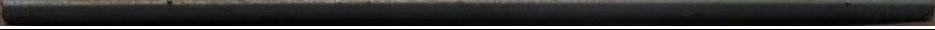
- **Ar+25%CO₂ com CO₂**: Os resultados estão de acordo com Ponomarev e Scotti (2008) quando relatam que a soldagem com CO₂, na transferência por curto-circuito, leva a um acabamento irregular dos cordões de solda, gerando muitos respingos e fumos, além de produzir maior quantidade de escória devido ao maior teor de oxigênio na região do arco elétrico.

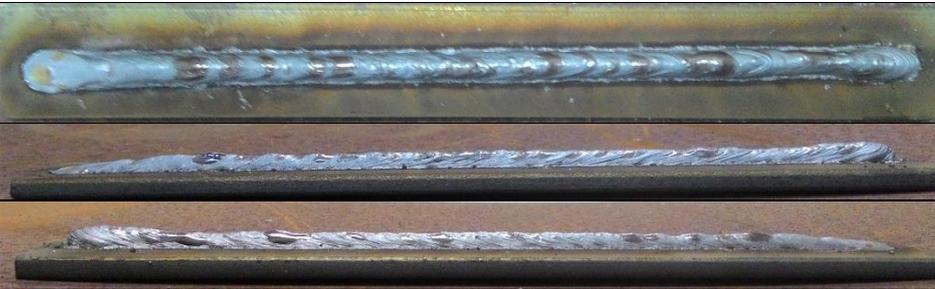
- **Ar+25%CO₂+2%H₂ com Ar+25%CO₂**: O comportamento de todos os aspectos é o mesmo. Já Tatagiba (2015), nessa mesma comparação, observa que o gás de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ apresenta, visualmente, uma tendência de produzir menos respingos e escória, além de identificar melhor aspecto do acabamento dos cordões de solda. Neste trabalho, a produção de respingos e de escória será melhor avaliada na análise quantitativa da taxa de respingos e da taxa de escória.

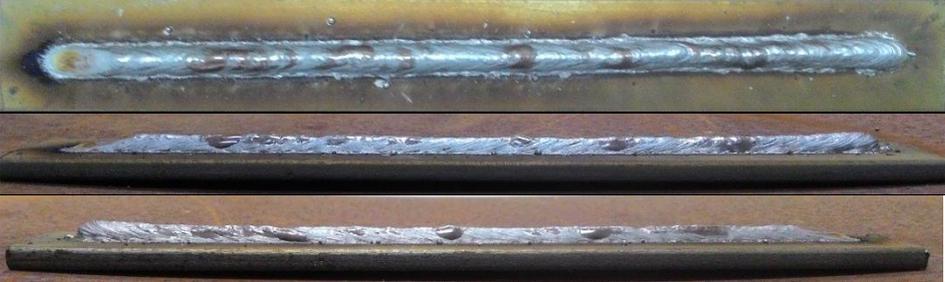
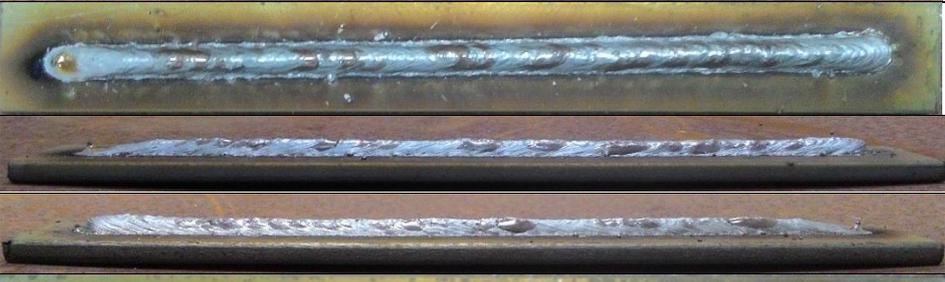
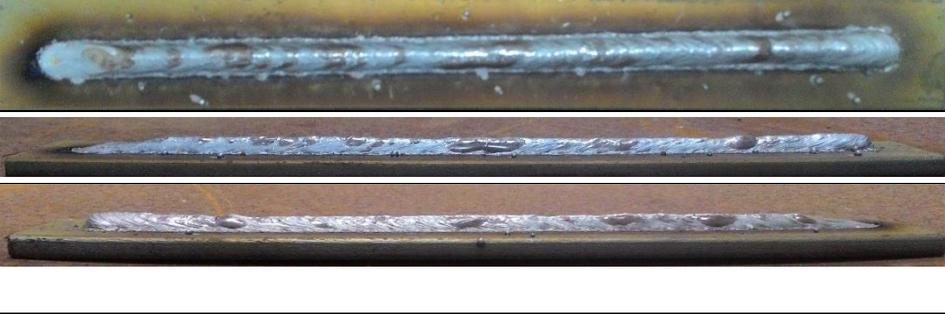
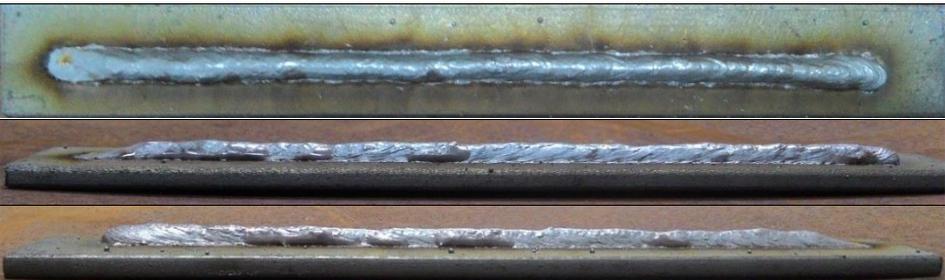
- **CO₂+4%H₂ com CO₂**: Os resultados estão de acordo com Tatagiba (2015) ao observar que CO₂+4%H₂, aparentemente, apresenta menor quantidade de respingos e escória. Tatagiba (2015) não identificou diferenças significativas no aspecto dos cordões de solda, sendo importante ressaltar que este autor realizou

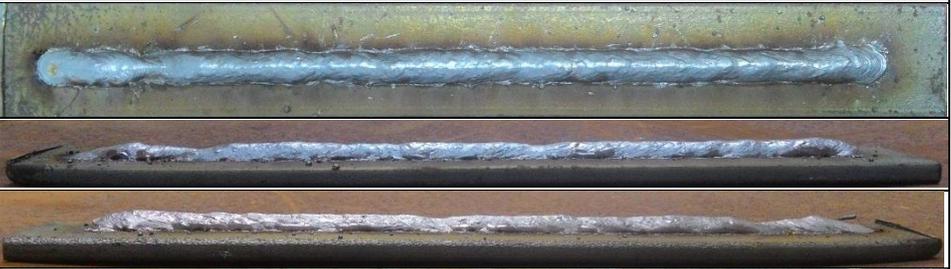
apenas uma repetição com as mesmas condições de soldagem devido a maior quantidade de gases utilizados em seus testes.

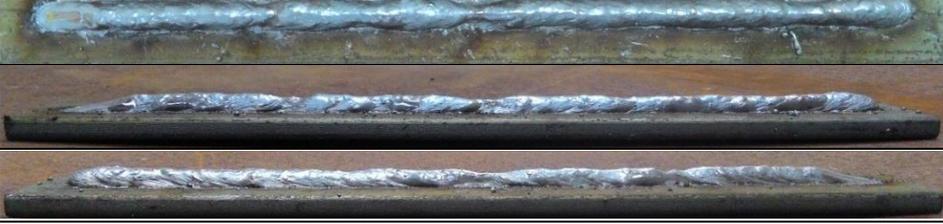
Quadro 7: Cordões de solda depositados para os quatro gases de proteção.

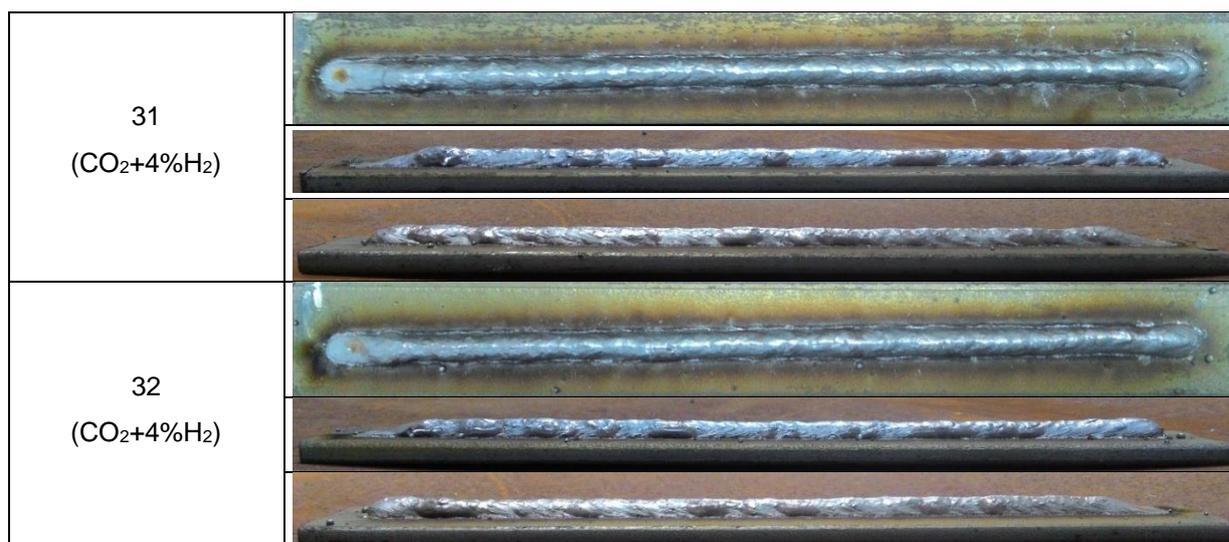
Nº da chapa	Ar+25%CO ₂
1 (Ar+25%CO ₂)	
	
	
2 (Ar+25%CO ₂)	
	
	
3 (Ar+25%CO ₂)	
	
	
4 (Ar+25%CO ₂)	
	
	
5 (Ar+25%CO ₂)	
	
	

<p>6 (Ar+25%CO₂)</p>	
<p>7 (Ar+25%CO₂)</p>	
<p>8 (Ar+25%CO₂)</p>	
<p>Nº da chapa</p>	<p>Ar+25%CO₂+2%H₂</p>
<p>9 (Ar+25%CO₂+2%H₂)</p>	
<p>10 (Ar+25%CO₂+2%H₂)</p>	
<p>11 (Ar+25%CO₂+2%H₂)</p>	

<p>12 (Ar+25%CO₂+2%H₂)</p>	
<p>13 (Ar+25%CO₂+2%H₂)</p>	
<p>14 (Ar+25%CO₂+2%H₂)</p>	
<p>15 (Ar+25%CO₂+2%H₂)</p>	
<p>16 (Ar+25%CO₂+2%H₂)</p>	
<p>Nº da chapa</p>	<p>CO₂</p>
<p>17 (CO₂)</p>	

<p>18 (CO₂)</p>	
<p>19 (CO₂)</p>	
<p>20 (CO₂)</p>	
<p>21 (CO₂)</p>	
<p>22 (CO₂)</p>	
<p>23 (CO₂)</p>	
<p>24 (CO₂)</p>	

	
Nº da chapa	CO ₂ +4%H ₂
<p>25 (CO₂+4%H₂)</p>	
<p>26 (CO₂+4%H₂)</p>	
<p>27 (CO₂+4%H₂)</p>	
<p>28 (CO₂+4%H₂)</p>	
<p>29 (CO₂+4%H₂)</p>	
<p>30 (CO₂+4%H₂)</p>	



Não foram identificadas descontinuidades superficiais após a limpeza das chapas. O Quadro 8 mostra os registros fotográficos de algumas chapas de teste. Novais (2010) afirma que a porosidade é resultado da prisão de um gás como o H₂ durante a solidificação e Modenesi *et al.* (2006) comentam que a presença deste gás na região de solda, sob determinadas condições, pode causar fissuração pelo hidrogênio. Os resultados estão de acordo com Tatagiba (2015) que afirmou que a soldagem com os respectivos gases de proteção não apresenta descontinuidades na inspeção visual de solda e por líquido penetrante.

Quadro 8: Fotografias das chapas para a inspeção visual de solda.

Chapa de teste	Chapas para inspeção visual.
Ar+25%CO ₂	
1	
2	
Ar+25%CO ₂ +2%H ₂	
9	
10	
CO ₂	
17	
18	
CO ₂ +4%H ₂	
25	
26	

A avaliação qualitativa evidencia que o gás $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ apresenta o mesmo desempenho de operação do que $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$. Já $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ produz menor quantidade de respingos e fumos, com respingos mais fáceis de serem removidos, ruídos com explosões mais regulares e cordões de solda com melhor aspecto. Em relação à escória, ainda não foi possível perceber, visualmente, mudanças devido à adição de H_2 . Além disso, a presença do hidrogênio nos gases $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ e $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$, sob essas condições, não ocasionou descontinuidades superficiais.

4.3 Geometria dos cordões de solda

As macrografias e os valores de largura, reforço, penetração e índice de convexidade (IC) dos cordões de solda estão relacionados na Tabela 6. A observação das macrografias mostra que a seção transversal 2 da chapa 29 tem apenas um poro e todas as outras não apresentam descontinuidades.

Tabela 6: Características geométricas: macrografias, largura (L), reforço (R), penetração (P) e índice de convexidade (IC).

Ar+25%CO₂			
 Chapa 1 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂)	L: 7,40 mm	 Chapa 1 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂)	L: 7,50 mm
	R: 4,95 mm		R: 4,60 mm
	P: 2,40 mm		P: 2,20 mm
	IC: 66,89 %		IC: 61,33 %
 Chapa 2 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂)	L: 7,60 mm	 Chapa 2 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂)	L: 7,20 mm
	R: 4,90 mm		R: 5,05 mm
	P: 2,50 mm		P: 2,45 mm
	IC: 64,47 %		IC: 70,14 %
	L: 7,25 mm		L: 7,35 mm
	R: 4,45 mm		R: 4,35 mm

 Chapa 3 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂)	P: 3,20 mm	 Chapa 3 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂)	P: 3,20 mm
	IC: 61,38 %		IC: 59,18 %
 Chapa 4 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂)	L: 7,25 mm	 Chapa 4 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂)	L: 6,85 mm
	R: 5,00 mm		R: 4,90 mm
	P: 2,30 mm		P: 2,00 mm
	IC: 68,97 %		IC: 71,53 %
 Chapa 5 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂)	L: 8,00 mm	 Chapa 5 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂)	L: 7,95 mm
	R: 4,30 mm		R: 4,45 mm
	P: 3,20 mm		P: 3,05 mm
	IC: 53,75 %		IC: 55,97 %
Ar+25%CO₂+2%H₂			
 Chapa 9 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	L: 8,10 mm	 Chapa 9 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	L: 8,00 mm
	R: 4,15 mm		R: 4,10 mm
	P: 3,80 mm		P: 3,20 mm
	IC: 51,23 %		IC: 51,25 %
 Chapa 10 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	L: 7,90 mm	 Chapa 10 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	L: 7,50 mm
	R: 4,90 mm		R: 4,55 mm
	P: 2,75 mm		P: 2,60 mm
	IC: 62,03 %		IC: 60,67 %
	L: 7,35 mm		L: 8,35 mm
	R: 4,20 mm		R: 4,60 mm

 Chapa 11 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	P: 2,80 mm	 Chapa 11 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	P: 3,10 mm
	IC: 57,14 %		IC: 55,09 %
 Chapa 12 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	L: 8,20 mm	 Chapa 12 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	L: 8,05 mm
	R: 4,20 mm		R: 4,45 mm
	P: 2,80 mm		P: 2,75 mm
	IC: 51,22 %		IC: 55,28 %
 Chapa 13 - Seção transversal 1 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	L: 8,60 mm	 Chapa 13 - Seção transversal 2 (Ar+25%CO ₂ +2%H ₂)	L: 8,80 mm
	R: 4,50 mm		R: 4,25 mm
	P: 3,10 mm		P: 3,10 mm
	IC: 52,33 %		IC: 48,30 %
CO₂			
 Chapa 17 - Seção transversal 1 (CO ₂)	L: 9,25 mm	 Chapa 17 - Seção transversal 2 (CO ₂)	L: 8,20 mm
	R: 4,40 mm		R: 4,10 mm
	P: 2,95 mm		P: 1,50 mm
	IC: 47,57 %		IC: 50,00 %
 Chapa 18 - Seção transversal 1 (CO ₂)	L: 7,70 mm	 Chapa 18 - Seção transversal 2 (CO ₂)	L: 8,00 mm
	R: 4,40 mm		R: 4,80 mm
	P: 3,50 mm		P: 2,50 mm
	IC: 57,14 %		IC: 60,00 %
	L: 8,30 mm		L: 5,80 mm
	R: 4,75 mm		R: 4,00 mm

 Chapa 19 - Seção transversal 1 (CO ₂)	P: 2,85 mm	 Chapa 19 - Seção transversal 2 (CO ₂)	P: 1,80 mm
	IC: 57,23 %		IC: 68,97 %
 Chapa 20 - Seção transversal 1 (CO ₂)	L: 7,60 mm	 Chapa 20 - Seção transversal 2 (CO ₂)	L: 8,00 mm
	R: 4,65 mm		R: 5,10 mm
	P: 2,65 mm		P: 2,90 mm
	IC: 61,18 %		IC: 63,75 %
 Chapa 21 - Seção transversal 1 (CO ₂)	L: 8,95 mm	 Chapa 21 - Seção transversal 2 (CO ₂)	L: 9,05 mm
	R: 3,80 mm		R: 4,50 mm
	P: 2,55 mm		P: 2,90 mm
	IC: 42,46 %		IC: 49,72 %
CO₂+4%H₂			
 Chapa 25 - Seção transversal 1 (CO ₂ +4%H ₂)	L: 7,20 mm	 Chapa 25 - Seção transversal 2 (CO ₂ +4%H ₂)	L: 7,25 mm
	R: 4,80 mm		R: 5,20 mm
	P: 2,70 mm		P: 2,90 mm
	IC: 66,67 %		IC: 71,72 %
 Chapa 26 - Seção transversal 1 (CO ₂ +4%H ₂)	L: 7,15 mm	 Chapa 26 - Seção transversal 2 (CO ₂ +4%H ₂)	L: 7,00 mm
	R: 4,65 mm		R: 5,20 mm
	P: 2,55 mm		P: 3,00 mm
	IC: 65,03 %		IC: 74,29 %
	L: 7,40 mm		L: 6,85 mm
	R: 4,80 mm		R: 4,85 mm

 Chapa 27 - Seção transversal 1 (CO ₂ +4%H ₂)	P: 2,75 mm	 Chapa 27 - Seção transversal 2 (CO ₂ +4%H ₂)	P: 2,75 mm
	IC: 64,86 %		IC: 70,80 %
 Chapa 28 - Seção transversal 1 (CO ₂ +4%H ₂)	L: 7,20 mm	 Chapa 28 - Seção transversal 2 (CO ₂ +4%H ₂)	L: 6,15 mm
	R: 4,80 mm		R: 4,75 mm
	P: 2,70 mm		P: 2,45 mm
	IC: 66,67 %		IC: 77,24 %
 Chapa 29 - Seção transversal 1 (CO ₂ +4%H ₂)	L: 8,20 mm	 Chapa 29 - Seção transversal 2 (CO ₂ +4%H ₂)	L: 8,40 mm
	R: 3,75 mm		R: 4,75 mm
	P: 2,60 mm		P: 3,15 mm
	IC: 45,73 %		IC: 56,55 %

A Tabela 7 mostra os valores de média aritmética e de desvio-padrão dos valores de penetração, reforço, largura e IC, além de corrente e tensão retiradas das Tabela 3 e 4. A Figura 33 mostra os gráficos com os valores de média aritmética e de desvio-padrão dos respectivos valores. A leitura dessas informações mostra o seguinte:

- **Ar+25%CO₂**: A média da penetração foi de 2,65 mm e o desvio-padrão de 0,46; a média da largura do cordão foi de 7,44 mm e o desvio-padrão de 0,35; a média do reforço do cordão foi de 4,70 mm e o desvio-padrão de 0,29; O índice de convexidade foi de 63,36 % e o desvio-padrão de 6,06.

- **Ar+25%CO₂+2%H₂**: Com a adição de H₂ no gás Ar+25%CO₂, a média de penetração aumentou para 3,00 mm e o desvio-padrão foi de 0,35; a média da largura do cordão também foi maior, de 8,09 mm, e o desvio-padrão foi de 0,45; já a média do reforço do cordão foi um pouco menor, de 4,39 mm, e o desvio-padrão foi de 0,25; o índice de convexidade melhorou, apresentando uma redução da média para 54,45 % e o desvio-padrão foi de 4,44.

- **CO₂**: A média da penetração foi a menor, de 2,61 mm, e desvio-padrão de 0,58; a média da largura do cordão foi de 8,09 mm e desvio-padrão de 0,98; a média do reforço do cordão foi de 4,45 mm e desvio-padrão de 0,40; a média do índice de convexidade foi de 55,80 % e o desvio-padrão de 8,19.

- **CO₂+4%H₂**: Com a adição de H₂ no gás CO₂, a média da penetração foi um pouco maior, de 2,76 mm, e o desvio-padrão foi de 0,21; a média da largura do cordão foi menor, de 7,28 mm, e o desvio-padrão foi de 0,64; a média do reforço do cordão aumentou para 4,76 mm e o desvio-padrão foi de 0,40; o índice de convexidade piorou, apresentando menor valor, de 65,96 %, e o desvio-padrão foi de 9,15.

Tabela 7: Média aritmética e desvio-padrão de penetração, largura, reforço, IC, corrente e tensão para cada gás de proteção.

Gás de proteção	Penetração (mm)		Largura (mm)		Reforço (mm)		IC (%)		Corrente (A)		Tensão (V)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Ar+25% CO ₂	2,65	0,46	7,44	0,35	4,70	0,29	63,36	6,06	226,8	8,7	20,1	0,2
Ar+25% CO ₂ +2% H ₂	3,00	0,35	8,09	0,45	4,39	0,25	54,45	4,44	229,5	7,7	20,9	0,3
CO ₂	2,61	0,58	8,09	0,98	4,45	0,40	55,80	8,19	231,6	12,1	21,0	0,3
CO ₂ +4% H ₂	2,76	0,21	7,28	0,64	4,76	0,40	65,96	9,15	226,7	3,6	21,0	0,1

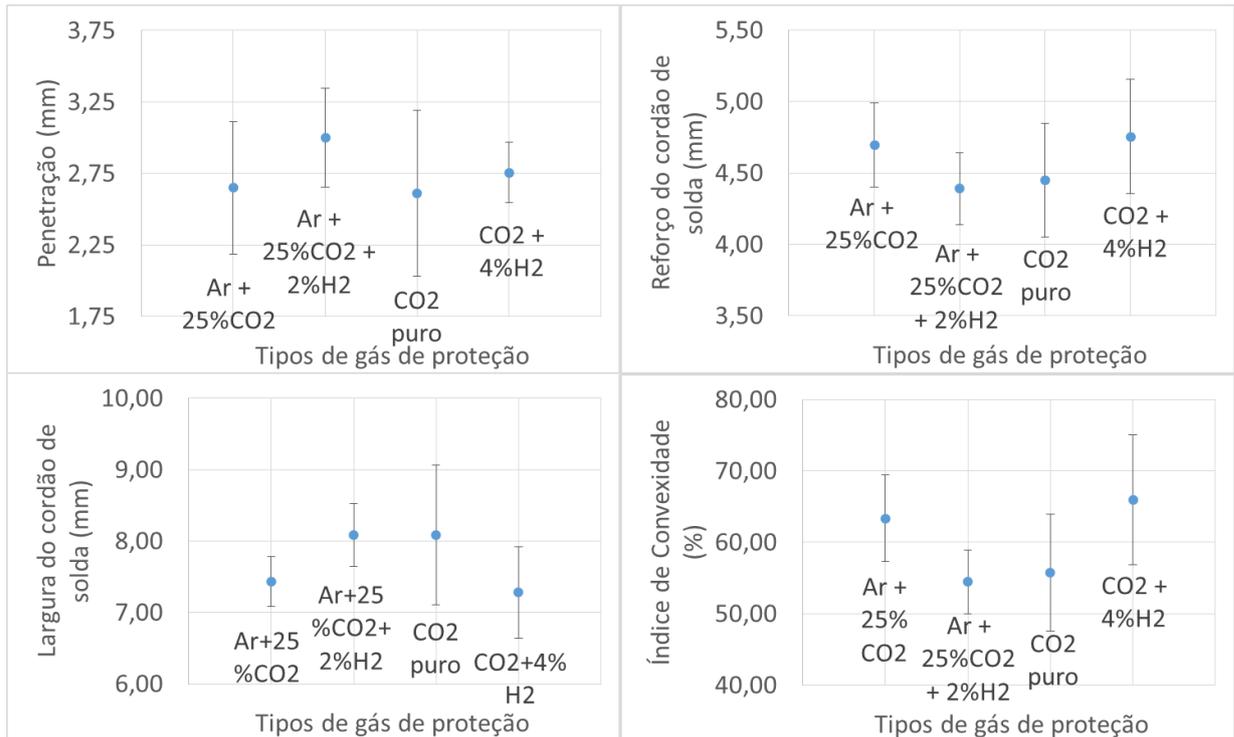


Figura 33: Valores de média aritmética e de desvio-padrão da penetração, da largura, do reforço e do índice de convexidade dos cordões de solda.

Os cordões mais largos e menos profundos do CO₂ em comparação com Ar+25%CO₂ estão de acordo com Taniguchi (1982) quando destaca que o arco constrito pelo uso do argônio ocasiona penetração profunda na região sob o arco, mas relativamente pequena nas áreas adjacentes e à medida que se aumenta a quantidade de CO₂ no argônio, a profundidade da penetração diminui e a largura do cordão aumenta. O reforço dos cordões também diminuiu. Fortes (2005) destaca que um grande reforço dificulta o depósito de passes de solda subsequentes com fusão adequada. Quando mais alto e estreito o cordão, maior a probabilidade de ocorrer falta de fusão.

A maior profundidade de penetração e de largura e menor reforço para o gás Ar+25%CO₂+2%H₂ em comparação com Ar+25%CO₂ pode ter relação com o trabalho de Hooijmans (1994) quando destaca que na soldagem GTAW, a presença do hidrogênio aumenta a tensão no arco devido à condutividade térmica mais elevada que a do argônio e Moreira (2008) quando afirma que um aumento de tensão do arco ocasiona cordão com maior largura, menor reforço e menor penetração. No entanto, é possível perceber que houve um aumento da penetração que pode ter sido consequência da energia de soldagem adicional identificada na

Tabela 4. Moreira (2008) afirma também que um aumento da corrente ocasiona maior profundidade de penetração, mostrando que o resultado está de acordo com esta afirmação. Em relação ao índice de convexidade, como a largura aumentou e o reforço diminuiu, o índice foi reduzido, aproximando-se do valor adequado de 30%. Tatagiba (2015) também relata que a adição de 2% de H₂ no gás de proteção Ar+25%CO₂ melhora o índice de convexidade.

A menor largura, a maior profundidade de penetração e maior reforço do gás CO₂+4%H₂ numa comparação com CO₂ pode ser explicado levando em consideração o trabalho de Moreira (2008) quando afirma que um aumento da corrente ocasiona maior profundidade de penetração. No entanto, a penetração foi um pouco maior e a corrente menor. Hooijmans (1994) afirma que na soldagem GTAW a presença do hidrogênio modifica o formato do arco e que a influência mais significativa é a sua contração. A redução significativa da largura do cordão de solda pode ter ocorrido devido à contração do arco elétrico. Como a energia de soldagem reduziu ligeiramente (ver Tabela 5) e a largura do cordão diminuiu significativamente, a mudança no formato do arco elétrico pode ter direcionado a energia para a região sob o arco, aumentando a penetração no metal de solda. O índice de convexidade foi maior devido à redução da largura e ao aumento do reforço do cordão de solda, piorando o índice que se afastou do valor adequado de 30%. Tatagiba (2015) relata que a adição de 4% de H₂ no gás de proteção CO₂ melhora o índice de convexidade, mostrando um resultado diferente do obtido por este trabalho.

Neste trabalho, foi possível perceber que o gás Ar+25%CO₂+2%H₂, numa comparação com Ar+25%CO₂, produz cordões mais profundos, mais largos, com menor reforço e índice de convexidade. Já o gás CO₂+4%H₂ produz cordões mais profundos, mais estreitos, com maior reforço e índice de convexidade. Os cordões de solda com melhor geometria ocorreram com Ar+25%CO₂+2%H₂ devido ao melhor índice de convexidade e maior profundidade de penetração. A ausência de descontinuidades significativas nas macrografias, juntamente com inspeção visual de solda, comprovam que é possível utilizar os gases de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ e CO₂+4%H₂ na soldagem GMAW de aços carbono.

4.4 Análise dos sinais do arco elétrico

A Tabela 8 mostra os valores de média e desvio-padrão utilizados nas Equações 3 e 6 para o cálculo dos índices de estabilidade CVPC, CVAA, CVCC, CVT e IVcc. Quanto menores os valores dos índices, mais regulares os sinais do arco elétrico e maior é a estabilidade.

Tabela 8: Média aritmética e desvio-padrão para picos de corrente, período de arco aberto, período de curto-circuito e período de transferência.

Chapa	Picos de Corrente		Período de arco aberto		Período de curto-circuito		Período de transferência	
	Média (A)	DP (A)	Média (ms)	DP (ms)	Média (ms)	DP (ms)	Média (ms)	DP (ms)
1	514,7	77,1	22,8	10,9	9,4	4,0	32,1	13,5
2	487,6	105,5	19,2	12,6	8,0	4,7	27,2	15,9
3	500,9	94,9	19,5	9,0	8,6	4,1	28,0	11,7
4	473,9	92,7	21,9	10,0	8,7	4,2	30,5	12,0
5	383,6	125,9	12,5	11,4	4,7	4,9	17,2	14,0
6	387,1	131,0	13,1	12,1	4,9	5,1	18,0	14,6
7	433,2	125,1	13,5	10,8	5,3	4,7	18,7	14,1
8	396,0	119,4	11,0	9,8	4,4	4,7	15,4	12,4
9	359,0	110,2	10,3	8,6	3,3	3,5	13,5	10,9
10	417,6	124,9	18,6	13,6	6,1	4,7	24,7	17,5
11	419,4	127,2	18,3	11,5	5,8	3,9	24,1	14,3
12	454,6	114,3	17,2	11,7	6,0	4,2	23,2	14,8
13	407,9	127,5	15,9	10,9	5,0	3,9	20,9	14,0
14	431,7	127,8	15,7	11,9	5,2	4,3	20,8	15,3
15	439,8	126,0	16,1	11,1	5,3	4,0	21,3	14,0
16	449,9	125,1	15,6	11,2	5,4	4,2	21,0	14,3
17	457,7	111,8	10,4	10,2	5,2	5,6	15,6	13,3
18	437,7	125,7	10,2	11,2	4,5	5,9	14,7	14,0
19	448,9	125,9	10,9	11,2	5,0	6,0	15,8	14,4
20	470,3	112,8	14,0	10,8	6,4	5,1	20,3	14,2
21	467,0	103,8	11,8	9,9	6,0	5,2	17,8	13,1
22	456,4	112,1	9,9	10,2	5,2	6,3	15,0	13,5
23	458,7	121,1	9,4	10,8	4,9	6,7	14,3	14,2
24	486,9	117,0	14,0	10,6	6,5	5,3	20,5	14,3
25	453,9	118,6	12,6	10,9	5,7	5,3	18,3	14,1
26	471,1	108,2	14,8	10,8	6,6	5,1	21,4	14,6
27	461,7	106,9	14,6	11,2	6,5	5,2	21,1	14,9
28	454,1	116,7	12,3	11,2	5,6	5,8	17,8	14,9
29	453,4	101,9	10,8	8,7	5,8	5,5	16,6	11,7
30	443,8	96,9	9,9	7,4	5,5	5,2	15,5	10,0
31	498,4	78,1	15,1	7,8	8,2	4,5	23,3	11,0
32	500,7	81,7	16,0	8,8	8,4	4,9	24,4	12,2

A Tabela 9 apresenta os valores de CVPC e a Figura 34 mostra um gráfico com os respectivos valores de média e de desvio-padrão. A soldagem com $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$ apresentou a menor média, de 21,8 % e desvio-padrão de 3,9 %, seguida de $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ com 25,1 % e desvio-padrão de 7,2 %. Para CO_2 , a média foi de 25,3 % e desvio-padrão de 2,2 %. $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$ apresentou o maior valor, de 29,2 % e desvio-padrão de 2,0 %.

Tabela 9: CVPC para os quatro tipos de gás de proteção.

Ar+25%CO ₂		Ar+25%CO ₂ +2%H ₂		CO ₂		CO ₂ +4%H ₂	
Chapa	CVPC (%)	Chapa	CVPC (%)	Chapa	CVPC (%)	Chapa	CVPC (%)
1	15,0	9	30,7	17	24,4	25	26,1
2	21,6	10	29,9	18	28,7	26	23,0
3	18,9	11	30,3	19	28,0	27	23,2
4	19,6	12	25,1	20	24,0	28	25,7
5	32,8	13	31,3	21	22,2	29	22,5
6	33,8	14	29,6	22	24,6	30	21,8
7	28,9	15	28,6	23	26,4	31	15,7
8	30,2	16	27,8	24	24,0	32	16,3
Média	25,1	-	29,2	-	25,3	-	21,8
Desvio-padrão	7,2	-	2,0	-	2,2	-	3,9

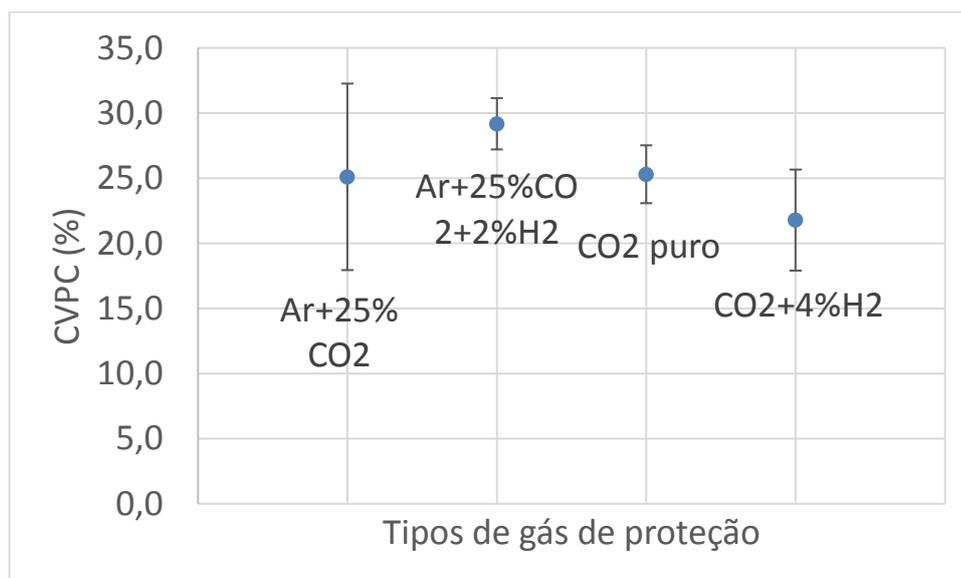


Figura 34: Média aritmética e desvio-padrão de CVPC para cada gás de proteção.

A Tabela 10 apresenta os valores de CVAA e a Figura 35 mostra um gráfico com os respectivos valores de média e de desvio-padrão. A soldagem com Ar+25%CO₂ apresentou a menor média, de 69,7 % e desvio-padrão de 21,0 %, seguida de Ar+25%CO₂+2%H₂ com 71,6 % e desvio-padrão de 6,2 %. Para CO₂+4%H₂, a média foi de 73,7 % e desvio-padrão de 13,9 % e o maior valor foi de 95,7 % e desvio-padrão de 14,9 % para CO₂.

Tabela 10: CVAA para os quatro tipos de gás de proteção.

Ar+25%CO ₂		Ar+25%CO ₂ +2%H ₂		CO ₂		CO ₂ +4%H ₂	
Chapa	CVAA (%)	Chapa	CVAA (%)	Chapa	CVAA (%)	Chapa	CVAA (%)
1	47,8	9	83,5	17	98,1	25	86,5
2	65,6	10	73,1	18	109,8	26	73,0
3	46,2	11	62,8	19	102,8	27	76,7
4	45,7	12	68,0	20	77,1	28	91,1
5	91,2	13	68,6	21	83,9	29	80,6
6	92,4	14	75,8	22	103,0	30	74,7
7	80,0	15	68,9	23	114,9	31	51,7
8	89,1	16	71,8	24	75,7	32	55,0
Média	69,7	-	71,6	-	95,7	-	73,7
Desvio-padrão	21,0	-	6,2	-	14,9	-	13,9

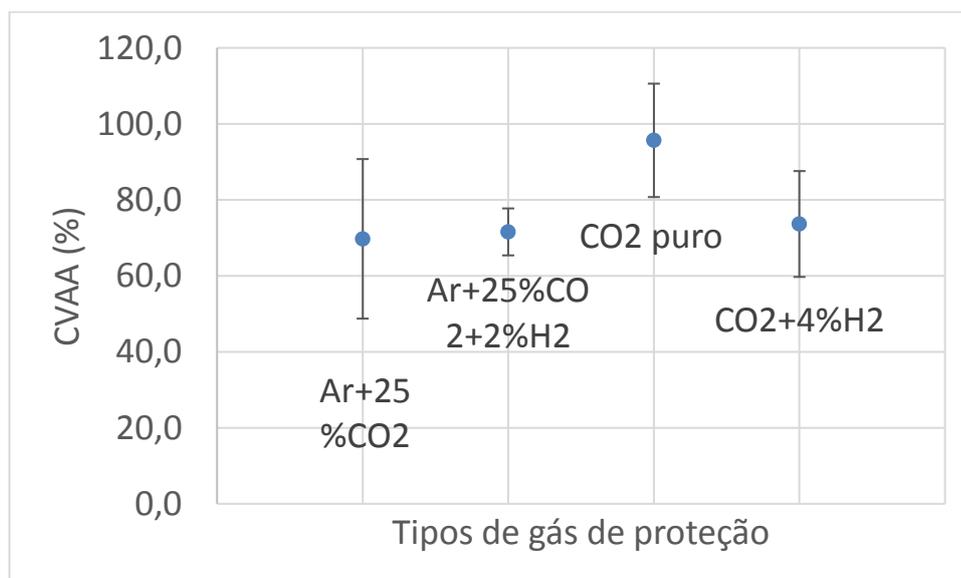


Figura 35: Média aritmética e desvio-padrão de CVAA para cada gás de proteção.

A Tabela 11 apresenta os valores de CVCC e a Figura 36 mostra um gráfico com os respectivos valores de média e de desvio-padrão. A soldagem com Ar+25%CO₂ apresentou a menor média, de 75,1 % e desvio-padrão de 28,5%, seguida de Ar+25%CO₂+2%H₂ com 79,3 % e desvio-padrão de 11,9 % e CO₂+4%H₂ com 82,1 % e desvio-padrão de 17,8 %. CO₂ apresentou o maior valor, de 108,1 % e desvio-padrão de 22,8 %.

Tabela 11: CVCC para os quatro tipos de gás de proteção.

Ar+25%CO ₂		Ar+25%CO ₂ +2%H ₂		CO ₂		CO ₂ +4%H ₂	
Chapa	CVCC (%)	Chapa	CVCC (%)	Chapa	CVCC (%)	Chapa	CVCC (%)
1	42,6	9	106,1	17	107,7	25	93,0
2	58,8	10	77,0	18	131,1	26	77,3
3	47,7	11	67,2	19	120,0	27	80,0
4	48,3	12	70,0	20	79,7	28	103,6
5	104,3	13	78,0	21	86,7	29	94,8
6	104,1	14	82,7	22	121,2	30	94,5
7	88,7	15	75,5	23	136,7	31	54,9
8	106,8	16	77,8	24	81,5	32	58,3
Média	75,1	-	79,3	-	108,1	-	82,1
Desvio-padrão	28,5	-	11,9	-	22,8	-	17,8

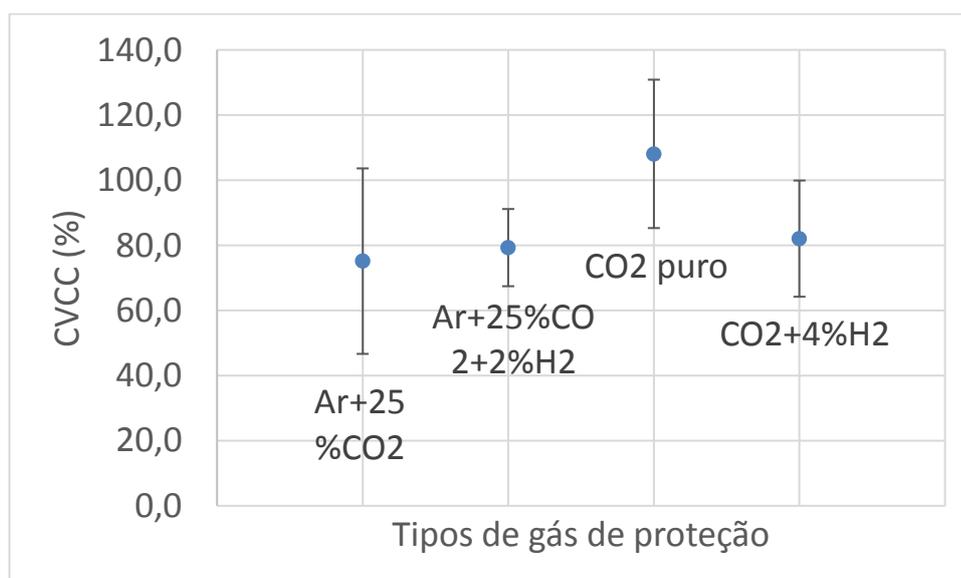


Figura 36: Média aritmética e desvio-padrão de CVCC para cada gás de proteção.

A Tabela 12 apresenta os valores de CVT e a Figura 37 mostra um gráfico com os respectivos valores de média e de desvio-padrão. A soldagem com Ar+25%CO₂ apresentou a menor média, de 62,5 % e desvio-padrão de 19,3 %, seguida de CO₂+4%H₂ com 66,5 % e desvio-padrão de 12,5 % e CO₂ com 66,5 % e desvio-padrão de 12,5 %. CO₂ apresentou o maior valor, de 84,3 % e desvio-padrão de 11,7 %.

Tabela 12: CVT para os quatro tipos de gás de proteção.

Ar+25%CO ₂		Ar+25%CO ₂ +2%H ₂		CO ₂		CO ₂ +4%H ₂	
Chapa	CVT (%)	Chapa	CVT (%)	Chapa	CVT (%)	Chapa	CVT (%)
1	42,1	9	80,7	17	85,3	25	77,0
2	58,5	10	70,9	18	95,2	26	68,2
3	41,8	11	59,3	19	91,1	27	70,6
4	39,3	12	63,8	20	70,0	28	83,7
5	81,4	13	67,0	21	73,6	29	70,5
6	81,1	14	73,6	22	90,0	30	64,5
7	75,4	15	65,7	23	99,3	31	47,2
8	80,5	16	68,1	24	69,8	32	50,0
Média	62,5	-	68,6	-	84,3	-	66,5
Desvio-padrão	19,3	-	6,5	-	11,7	-	12,5

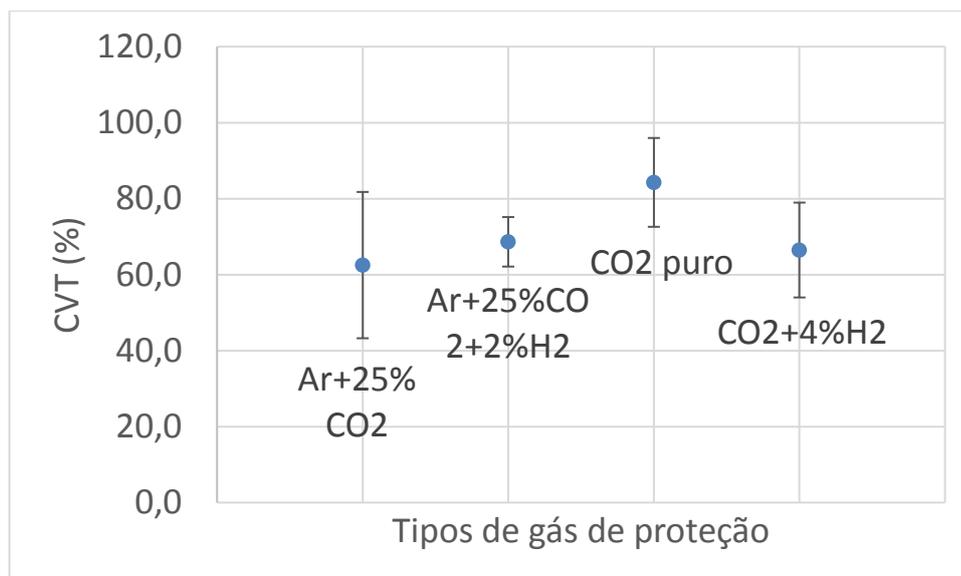


Figura 37: Média aritmética e desvio-padrão de CVT para cada gás de proteção.

A Tabela 13 mostra os valores de IV_{CC} e a Figura 38 mostra um gráfico com os respectivos valores de média e de desvio-padrão. A soldagem com $Ar+25\%CO_2$ apresentou a menor média, de 1,4 e desvio-padrão de 0,5, seguida de $Ar+25\%CO_2+2\%H_2$ com 1,5 e desvio-padrão de 0,2 e $CO_2+4\%H_2$ com 1,6 e desvio-padrão de 0,3. CO_2 apresentou o maior valor, de 2,0 e desvio-padrão de 0,4.

Tabela 13: IV_{CC} para os quatro tipos de gás de proteção.

Ar+25%CO ₂		Ar+25%CO ₂ +2%H ₂		CO ₂		CO ₂ +4%H ₂	
Chapa	IV _{CC}	Chapa	IV _{CC}	Chapa	IV _{CC}	Chapa	IV _{CC}
1	0,9	9	1,9	17	2,1	25	1,8
2	1,2	10	1,5	18	2,4	26	1,5
3	0,9	11	1,3	19	2,2	27	1,6
4	0,9	12	1,4	20	1,6	28	1,9
5	2,0	13	1,5	21	1,7	29	1,8
6	2,0	14	1,6	22	2,2	30	1,7
7	1,7	15	1,4	23	2,5	31	1,1
8	2,0	16	1,5	24	1,6	32	1,1
Média	1,4	-	1,5	-	2,0	-	1,6
Desvio-padrão	0,5	-	0,2	-	0,4	-	0,3

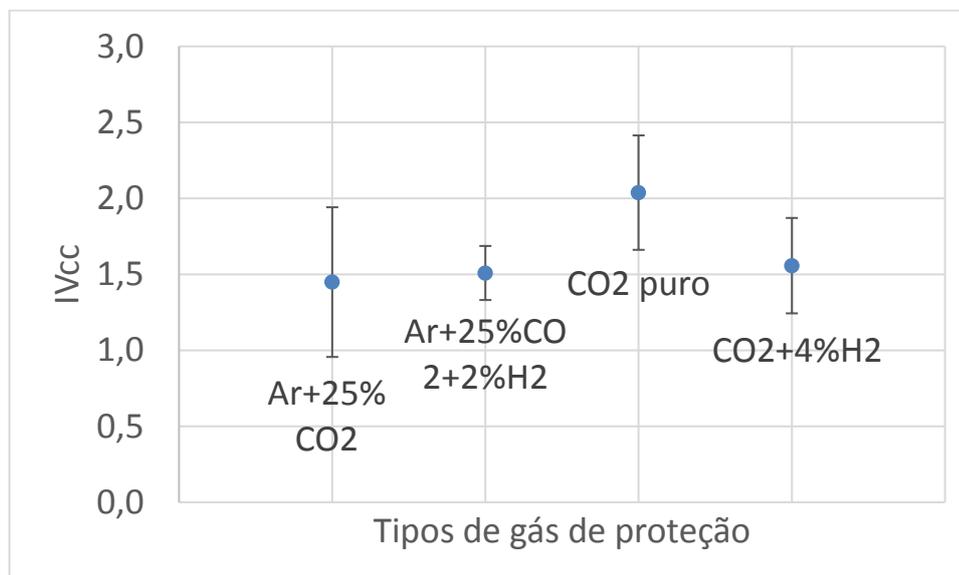


Figura 38: Média aritmética e desvio-padrão de IV_{CC} para cada gás de proteção.

As médias dos índices foram submetidas ao teste t para avaliar se há diferença significativa entre elas. A Tabela 14 mostra os valores do p (bilateral) para

a comparação entre as médias. Os números menores do que 0,05 foram destacados na tabela e indicam que há diferença significativa da estabilidade do arco elétrico com 95% de confiabilidade. A observação da Tabela 14 mostra o seguinte:

- **Ar+25%CO₂**: Numa comparação com os gases de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ e CO₂+4%H₂, o teste *t* mostra que não há diferença significativa entre os valores dos índices. Ao comparar com CO₂, o teste *t* mostra que não há diferença entre os valores de CVPC e que CVAA, CVCC, CVT e IVcc são significativamente menores.

- **Ar+25%CO₂+2%H₂**: Numa comparação com CO₂, o teste *t* mostra que o valor de CVPC é maior. Já os valores de CVAA, CVCC, CVT e IVcc são menores. Ao comparar com CO₂+4%H₂, CVPC é maior e os valores de CVAA, CVCC, CVT e IVcc são significativamente iguais.

- **CO₂+4%H₂**: O teste *t* mostra que todos os valores são menores do que para CO₂.

- **CO₂**: O teste *t* mostra que os valores de CVAA, CVCC, CVT e IVcc são os maiores.

Tabela 14: Valores de p (bilateral) para a comparação entre as médias obtidos pelo programa BioEstat 5.0.

Comparação entre os gases de proteção	CVPC	CVAA	CVCC	CVT	IVcc
Ar+25%CO ₂ x Ar+25%CO ₂ +2%H ₂	0,1603	0,8207	0,7140	0,4186	0,7589
Ar+25%CO ₂ x CO ₂	0,9453	0,0129	0,0229	0,0160	0,0205
Ar+25%CO ₂ x CO ₂ +4%H ₂	0,2688	0,6672	0,5713	0,6337	0,6110
Ar+25%CO ₂ +2%H ₂ x CO ₂	0,0024	0,0022	0,0068	0,0051	0,0024
Ar+25%CO ₂ +2%H ₂ x CO ₂ +4%H ₂	0,0003	0,7059	0,7209	0,6689	0,7004
CO ₂ x CO ₂ +4%H ₂	0,0435	0,0087	0,0233	0,0105	0,0133

Os menores valores dos índices CVAA, CVCC, CVT e IVcc indicam que o arco elétrico na soldagem com Ar+25%CO₂ é mais estável do que com CO₂. Este comportamento está de acordo com Ponomarev e Scotti (2008) quando destacam que Ar+25%CO₂ reduz em muito a quantidade de respingos e melhora o aspecto superficial do cordão, apresentando arco elétrico com maior estabilidade. O índice CVPC não apresentou resultado esperado para esta análise. Ponomarev e Scotti

(2008) destacam que a análise estatística dos sinais do arco elétrico nem sempre é uma abordagem apropriada, mas que não deve ser descartada, sendo importante analisar a estabilidade do processo como um todo a partir da observação dos oscilogramas, das características dos ruídos e luminosidades, nível e dimensões dos respingos e de todos os índices que possam ser medidos. O gás de proteção Ar+25%CO₂ obteve mais regularidade na avaliação qualitativa da inspeção visual, mostrando que este índice não foi eficaz para comparar os respectivos gases de proteção.

Os menores valores dos índices indicam que o arco elétrico na soldagem com CO₂+4%H₂ é mais estável do que com CO₂, o que está de acordo com Tatagiba (2015) quando relata que a adição de 4% de H₂ no gás CO₂ apresenta menores valores de desvio-padrão de picos de corrente, período de arco aberto, período de curto-circuito e de IV_{cc}. Os índices analisados são coeficientes de variação que representam valores de desvio-padrão expresso como porcentagem de médias diferentes. Os picos de corrente e os períodos de transferência, de curto circuito e de arco aberto mais regulares indicam que o contato gota/poça de fusão foram mais constantes, mostrando que a transferência metálica ocorreu com maior regularidade devido à presença do H₂ como gás redutor que diminuiu o potencial de oxidação do gás e favoreceu a estabilidade do processo.

Os valores dos índices são significativamente iguais na soldagem com Ar+25%CO₂ e com Ar+25%CO₂+2%H₂, mostrando que a estabilidade do arco elétrico é a mesma. Os menores valores de desvio-padrão das médias para Ar+25%CO₂+2%H₂ evidenciam ainda que a presença do H₂ diminuiu a dispersão dos dados, o que pode ser considerado como maior estabilidade do arco elétrico. Na inspeção visual deste trabalho também não foi possível identificar mudanças significativas entre os gases de proteção. Tatagiba (2015) relata que a adição de 2% de H₂ no gás Ar+25%CO₂ diminui os valores de desvio-padrão de picos de corrente, período de arco aberto, período de curto-circuito e IV_{cc}, indicando maior estabilidade do arco elétrico. Este autor realizou uma repetição para cada tensão com todos os parâmetros iguais e neste trabalho foram sete repetições. O depósito de cordões de solda em mais chapas de teste pode ter identificado que a presença de H₂ no gás Ar+25%CO₂ não altera significativamente o comportamento dos sinais do arco elétrico. A presença de hidrogênio no gás de proteção não teve uma diferença

considerável na estabilidade do arco elétrico porque o gás Ar+25%CO₂ apresenta uma boa estabilidade, diferente do gás de proteção CO₂, além do menor teor de H₂ que foi adicionado.

Souza *et al.* (2011) citam que índices relacionados aos sinais do arco elétrico são utilizados para mensurar a estabilidade do processo no modo de transferência por curto-circuito. Neste trabalho, os índices mostram que o arco elétrico com CO₂+4%H₂ é mais estável do que com CO₂. Já os gases Ar+2%CO₂+2%H₂ e Ar+25%CO₂ apresentam arcos com mesma estabilidade. Além disso, o índice CVPC que mostrou que os gases Ar+25%CO₂ e CO₂ apresentam mesma estabilidade de arco, não foi eficiente para esta comparação.

4.5 Taxas de respingos e de escória

4.5.1 Taxa de respingos

A Figura 39 mostra os respingos coletados para cada gás de proteção e a Tabela 15 apresenta os dados do cálculo da taxa de respingos obtida pela Equação 6. A observação dessas informações mostra o seguinte:

- **CO₂**: Foi o gás que obteve a maior taxa de respingos, de 2,52 g/min. Ainda, observa-se qualitativamente (visualmente) na figura 1 que os respingos apresentam os maiores tamanhos.

- **CO₂+4%H₂**: A adição de 4% de H₂ ao gás CO₂ reduziu a taxa de respingos de 2,52 g/min para 1,53 g/min. Ainda, observa-se visualmente na figura 1 que os respingos apresentam menor tamanho do que com CO₂.

- **Ar+25%CO₂**: A taxa de respingos foi de 1,04 g/min, valor bem inferior ao obtido com o CO₂. Nota-se também que visualmente (veja Figura 39) os respingos apresentam menores tamanhos do que para CO₂.

- **Ar+25%CO₂+2%H₂**: Foi o gás que obteve a menor taxa de respingos, de 0,92 g/min, inferior à obtida com a mistura sem adição de H₂, que foi de 1,04 g/min. Observa-se também, visualmente, que a adição de H₂ reduziu um pouco o tamanho dos respingos.

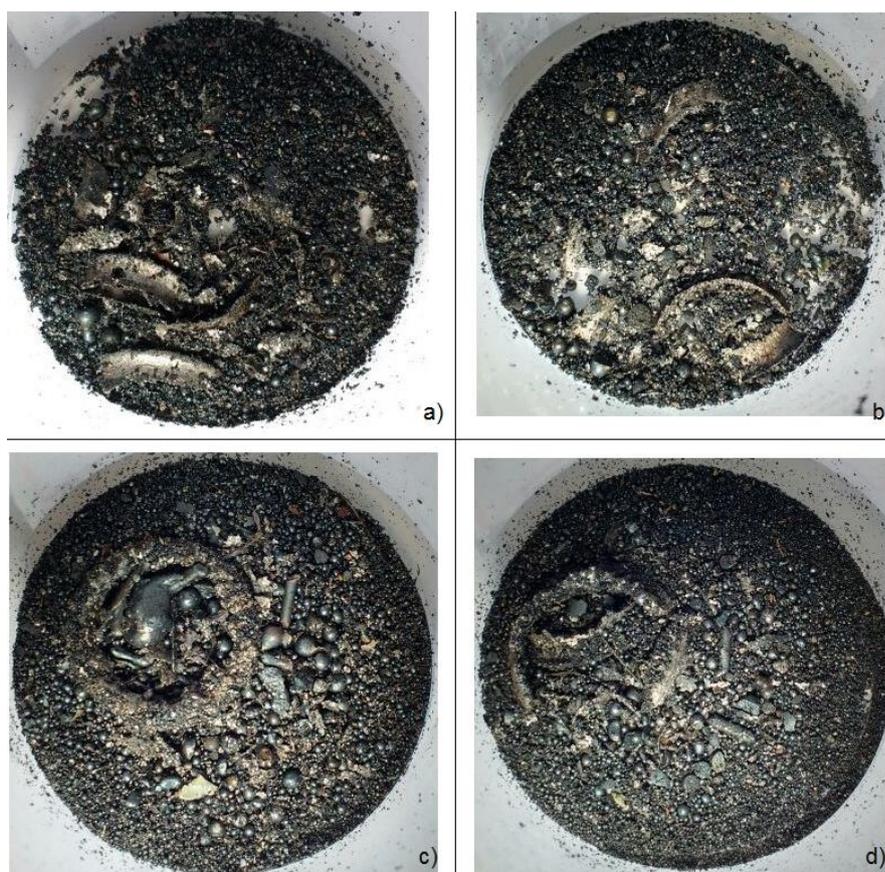


Figura 39: Respingos coletados para cada gás de proteção. a) Ar+25%CO₂; b) Ar+25%CO₂+2%H₂; c) CO₂; d) CO₂+4%H₂.

Tabela 15: Dados para o cálculo da taxa de respingos.

Gás de proteção	Massa dos respingos (g)	Somatório do tempo de soldagem (min)	Taxa de Respingos (g/min)
Ar+25%CO ₂	6,17	5,92	1,04
Ar+25%CO ₂ +2%H ₂	5,35	5,82	0,92
CO ₂	14,14	5,61	2,52
CO ₂ +4%H ₂	8,73	5,69	1,53

A menor quantidade e o menor tamanho de respingos com o gás Ar+25%CO₂ comparado ao CO₂ está de acordo com Ponomarev e Scotti (2008) quando afirmam que no modo de transferência por curto-circuito, maior quantidade de CO₂ gera muitos respingos e fumos, proporcionando gotas com tamanhos maiores com uma tendência de repulsão pelo próprio arco elétrico. Na inspeção visual deste trabalho já

realizada foi possível perceber, visualmente, menor quantidade de respingos para o gás Ar+25%CO₂ em comparação com o CO₂.

A menor quantidade e os menores respingos para o gás Ar+25%CO₂+2%H₂ em comparação com Ar+25%CO₂ e para CO₂+4%H₂ comparado ao CO₂ podem estar relacionados com Ponomarev e Scotti (2008) quando destacam que para a soldagem com CO₂, a região de acoplamento do arco com a gota tem muito calor, gerando vapores metálicos que agem no sentido de manter a gota mais tempo retida, aumentando o seu diâmetro crítico (chamada de força de reação por vaporização). Além disso, jatos de plasma repelidos da peça podem manter a gota fora do seu centro por longos períodos, ocasionando a sua repulsão e gerando respingos. A presença de H₂ como agente redutor pode ter diminuído o potencial de oxidação do gás de proteção, reduzindo a quantidade de vapores metálicos nas regiões de acoplamento do arco elétrico, o que reduz o efeito da força de reação de vaporização e o diâmetro crítico das gotas, repulsando respingos de menores tamanhos. Outra justificativa para este resultado é que a presença do H₂ no gás de proteção pode ter ocasionado uma contração do arco elétrico. De acordo com Ponomarev e Scotti (2008), a força de arraste é originada pelo jato de plasma em contato com a gota que tende a contribuir para o seu destacamento. A contração do arco elétrico pode ter concentrado a força de arraste, facilitando a sua transferência e reduzindo o seu diâmetro crítico. A diferença mais significativa para a adição de 4% de H₂ no gás de proteção CO₂ em comparação com a adição de 2% de H₂ no gás de proteção Ar+25%CO₂ decorre do maior potencial de oxidação do CO₂ (maior quantidade de respingos) e do maior teor de H₂ (4%) que reduziu mais significativamente o potencial de oxidação do gás de proteção.

4.5.2 Taxa de escória

A Figura 40 mostra a escória coletada para cada gás de proteção e a Tabela 16 apresenta os dados do cálculo da taxa de escória (Equação 7). A observação dessas informações mostra o seguinte:

- **Ar+25%CO₂**: apresentou a menor taxa de escória, de 0,11 g/min.
- **Ar+25%CO₂+2%H₂**: a adição de 2% de H₂ ao Ar+25%CO₂ aumentou a taxa de respingos de 0,11 g/min para 0,15 g/min.

- CO_2 : apresentou taxa de escória de 0,13 g/min, superior à obtida por $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$.

- $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$: A adição de 4% de H_2 ao CO_2 aumentou significativamente a taxa de escória de 0,13 g/min para 0,23 g/min.

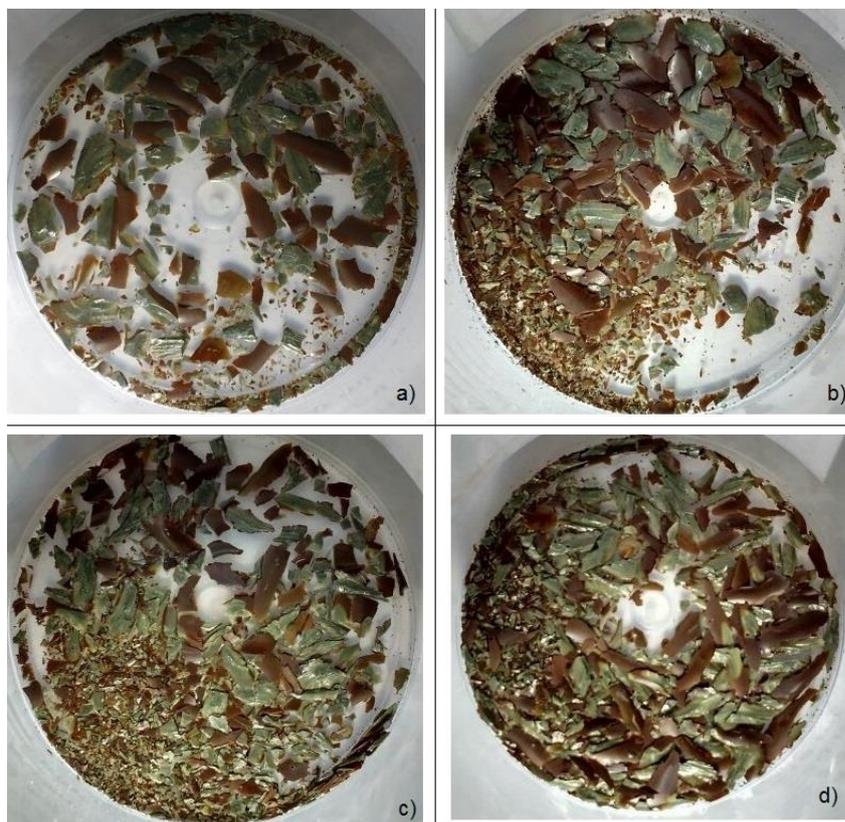


Figura 40: Escória coletada para cada gás de proteção. a) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$; b) $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$; c) CO_2 ; d) $\text{CO}_2+4\%\text{H}_2$.

Tabela 16: Dados para o cálculo da taxa de escória.

Gás de proteção	Massa da escória (g)	Somatório do tempo de soldagem (min)	Taxa de Escória (g/min)
$\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$	0,66	5,92	0,11
$\text{Ar}+25\%\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$	0,90	5,82	0,15
CO_2	0,72	5,61	0,13
$\text{CO}_2+2\%\text{H}_2$	1,32	5,69	0,23

A maior quantidade de escória para CO_2 em comparação com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ está de acordo com Stenbacka e Persson (1989) quando afirmam que um gás com

maior quantidade de oxigênio aumenta a formação de escória na superfície do cordão de solda. Na inspeção visual deste trabalho foi possível perceber, qualitativamente, menor quantidade de escória para o gás Ar+25%CO₂.

Uma possível explicação para o gás de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ ter produzido um pouco mais de escória do que Ar+25%CO₂ é Ponomarev e Scotti (2008) destacam que o H₂ na soldagem GMAW age em relação à estabilidade como se fosse inerte. A princípio, a adição de H₂ reduz o potencial de oxidação do gás de proteção, tendendo a formar menos escória por causa da menor quantidade de oxigênio no arco elétrico. Tatagiba (2015) afirma que, visualmente, a quantidade de escória das soldas com Ar+25%CO₂+2%H₂ é menor do que com Ar+25%CO₂. A maior quantidade de escória para o gás com H₂ pode estar relacionada com o aumento da energia de soldagem (ver Tabela 3) que favorece a ocorrência de outras reações para a formação de mais óxidos na poça de fusão ou pela possível contração do arco elétrico modifica a distribuição de temperatura e acabou favorecendo a formação de escória.

A maior quantidade de escória para CO₂+4%H₂ em comparação com CO₂ é um resultado diferente de Tatagiba (2015) que observou visualmente que a adição de 4% de H₂ reduz a quantidade de escória. A justificativa para este resultado é diferente do caso anterior, já que houve uma redução da energia de soldagem (ver Tabela 4). Provavelmente, mesmo com a redução do potencial de oxidação do gás CO₂ devido à adição de H₂, a atmosfera ainda apresenta quantidade significativa de oxigênio para as reações. A possível contração do arco ocasionada pelo H₂ mudou a distribuição de temperatura e calor ao longo do arco, concentrando mais energia numa região pontual que pode ter favorecido a ocorrência de óxidos na superfície, formando mais escória na superfície do cordão de solda.

Adolfsson *et al.* (1999) afirmam que a máxima estabilidade do processo capaz de garantir qualidade à solda ocorre quando o nível de respingos é mínimo. Neste trabalho, a quantidade um pouco menor de respingos produzidos pelo gás Ar+25%CO₂+2%H₂ em comparação com Ar+25%CO₂, juntamente com a análise dos sinais do arco elétrico, indicam que esses gases apresentam a mesma estabilidade de processo. Já a menor quantidade de respingos coletados para o gás CO₂+4%H₂ em comparação com CO₂, juntamente com a análise dos sinais do arco elétrico, indicam que CO₂+4%H₂ apresenta significativamente maior estabilidade.

Neste trabalho foram utilizados oito corpos de prova para acumular maiores quantidades de escória e de respingos suficientes para a análise quantitativa. A avaliação dos respingos foi eficiente e está de acordo com o comportamento dos índices de estabilidade, com a avaliação qualitativa do processo da inspeção visual de solda e com Tatagiba (2015). Em relação à escória, os resultados foram diferentes do esperado e da avaliação qualitativa de Tatagiba (2015), mostrando que a quantidade de escória coletada ainda foi muito pequena, o que torna o erro experimental muito significativo. Para futuros trabalhos, recomenda-se depositar cordões de maiores comprimentos e em menores quantidades de chapas de teste para minimizar o erro experimental das coletas em trabalhos futuros.

4.6 Microestrutura do metal de solda e dureza Vickers

A Figura 41 mostra micrografias e alguns de seus constituintes identificados. Os constituintes microestruturais do metal de solda são os mesmos para os quatro gases de proteção e a sua caracterização evidencia que há predominância de ferrita primária de contorno de grão – PF (G) e ferrita poligonal intragranular – PF (I). A ferrita de segunda fase alinhada – FS (A) e a ferrita de segunda fase não alinhada – FS (NA) aparecem em menor quantidade. É possível identificar também uma quantidade muito pequena de agregado ferrita-carboneto – FC e de ferrita acicular – AF.

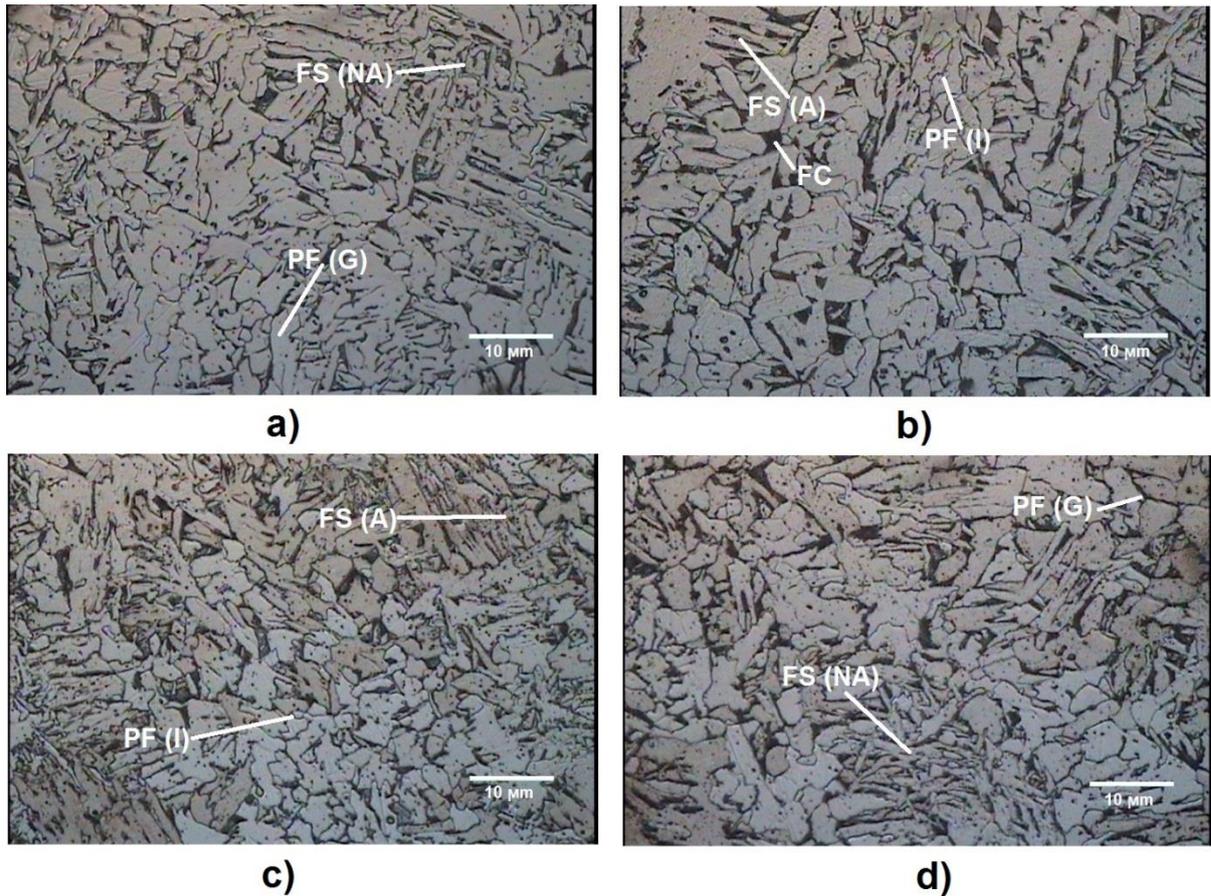


Figura 41: Micrografias obtidas para cada gás de proteção. a) Ar+25%CO₂ b) Ar+25%CO₂+2%H₂ c) CO₂ d) CO₂+4%H₂. Aumento 250X.

A Tabela 17 mostra os valores de dureza Vickers obtidos no metal de base, na zona termicamente afetada e na zona fundida. Na zona fundida, a menor média aritmética ocorreu para Ar+25%CO₂+2%H₂, de 172 HV e desvio-padrão de 9 HV e para Ar+25%CO₂, a média ficou bem próxima, registrando 173 HV e desvio-padrão de 14 HV. Para CO₂ o valor foi um pouco maior, de 180 HV e desvio-padrão de 15 HV, e para CO₂+4%H₂, a média foi de 200 HV e desvio-padrão de 20 HV.

Tabela 17: Valores de dureza Vickers medidos no metal de base, na zona termicamente afetada e no metal de solda.

Medições	Região	Dureza (HV)			
		Ar+25%CO ₂	Ar+25%CO ₂ +2% H ₂	CO ₂	CO ₂ +4%H ₂
1	Metal de base	155	160	191	167
2		169	149	174	165
3		170	146	155	176
4	Zona termicamente afetada	171	168	191	202
5		175	179	182	170
6		188	188	183	178
7	Zona fundida	181	170	186	211
8		155	176	202	181
9		167	180	161	169
10		193	162	167	202
11		163	162	180	215
12		179	182	184	219
13	Zona termicamente afetada	164	163	187	203
14		169	195	184	164
15		162	192	159	189
16	Metal de base	144	217	158	187
17		125	197	157	156
18		142	177	177	174
Média na Zona Fundida		173	172	180	200
Desvio-padrão na Zona Fundida		14	9	15	20

Os constituintes microestruturais encontrados na análise dos quatro gases de proteção são típicos do metal de solda de aços ferríticos (Perdigão, 1987). Não foi identificada a presença de martensita. De acordo com Modenesi *et al.* (2006), a martensita é mais sensível à fissuração pelo hidrogênio devido a sua elevada dureza.

Não há diferenças significativas de dureza Vickers entre os gases de proteção. Os valores obtidos estão abaixo de 250 HV, mostrando que a região analisada tem boa ductilidade.

A microestrutura do metal de solda predominantemente ferrítica e os valores de dureza Vickers abaixo de 250 HV indicam que as fases presentes têm boa ductilidade e ausência de fases frágeis, evidenciando que a soldagem com H₂ no gás de proteção é possível, pois nessas condições de soldagem, a fissuração pelo hidrogênio não é favorecida.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, onde na soldagem GMAW de aço carbono foi avaliado o efeito da adição de 2% de H₂ no Ar+25%CO₂ e de 4% de H₂ no CO₂, com os parâmetros de soldagem utilizados, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A adição de H₂, nos teores usados, não ocasiona descontinuidades superficiais nos cordões de solda

- A adição de H₂ em Argônio+25%CO₂ aumenta a penetração e a largura, diminui o reforço e o índice de convexidade dos cordões de solda, e em CO₂, aumenta a penetração, diminui a largura, aumenta o reforço e o índice de convexidade dos cordões de solda;

- Os cordões de solda com melhor geometria ocorreram com Ar+25%CO₂+2%H₂ devido ao melhor índice de convexidade e maior profundidade de penetração;

- A análise dos sinais elétricos indica que a adição de H₂ no gás Argônio+25%CO₂ não altera a estabilidade do arco elétrico, e em CO₂, a estabilidade melhora significativamente;

- A adição de H₂ reduz a quantidade e o tamanho dos respingos produzidos e pode gerar mais escória;

- A adição de H₂ nos gases não ocasiona diferenças significativas dos constituintes microestruturais ou de dureza Vickers.

- De uma forma geral, a adição de 2% de H₂ no gás Argônio+25%CO₂ não muda a estabilidade do processo e a adição de 4% de H₂ no gás de proteção CO₂ melhora significativamente a estabilidade do processo.

- A metodologia da coleta dos respingos foi eficiente, mas há necessidade de realizar outros experimentos para quantificar a escória.

6 SUGESTÕES

Para futuras pesquisas, as sugestões são as seguintes:

- Regular a tensão dentro de uma faixa de valores para os gases de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ e CO₂+4%H₂ para encontrar a melhor condição de operação.

- Depositar cordões de solda com velocidades de soldagem maiores para Ar+25%CO₂+2%H₂ e comparar com Ar+25%CO₂ para encontrar o ponto em que a geometria dos cordões é semelhante.

- Utilizar os gases de proteção Ar+25%CO₂+2%H₂ e CO₂+4%H₂ na soldagem em outras posições e em chanfros.

- Regular os valores de tensão e corrente a partir de um menor valor de DBCP na soldagem com os gases de proteção CO₂ e CO₂+4%H₂ para diminuir a quantidade de respingos que caem fora do coletor.

- Medir o tamanho dos respingos coletados.

- Depositar cordões de solda com maiores comprimentos e em menores quantidades de chapas para minimizar o erro experimental da coleta de escória.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjö, G., Claesson, I. (1999) *On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding*. Welding Journal, p. 59-73.

Althouse A. D., Turnquist C. H., Bowditch W. A., Bowditch K. E. (1992) *Gas tungsten arc welding*. *Modern Welding*, p. 327–328.

Ayres, M., Ayres Junior, M., Ayres, D., Santos, A., Ayres L. (2007) *BioEstat 5.0: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas*. Belém: Sociedade Civil Mamirauá: Brasília CNPq, 364p.

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

Bracarense, A. Q., Marques, P. V., Modenesi, P. J. (2007) *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 2. ed. Belo Horizonte - MG: Editora UFMG, 363p.

Brandi, S. D., Mello, F. D. H., Wainer, E. (2004) *Soldagem: processos e metalurgia*. 1. ed. São Paulo - SP: Edgar Blucher Ltda., 504p.

Dantas, M. S., Costa, S. C. (2004) *Uma Contribuição ao Estudo da Influência dos Parâmetros de Pulso na Qualidade da Solda em um Processo MIG/MAG Pulsado através da Técnica DOE*. XXIV Enegep, Florianópolis - SC, p.561-568.

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

ESAB. (2014) *Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW)*. http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cf m em 25/03/2016.

FBTS. (2015) *Processos de Soldagem: Soldagem MIG/MAG*. http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1_D4_T4_MIG%20MAG.pdf em 25/03/2016.

Fernandes, D. B., Menezes, L. C., Vilarinho, L. O., Scotti, A. (2010) *Ensaio para medição de nível e alcance de respingos em soldagem MIG/MAG*. *Soldagem e Inspeção (Impresso)*, v. 15, p. 150-155.

Fonseca, A. F., Avelar, R. C., Modenesi, P. J. (1996) *Efeito de Variações nas Características de Arames na Soldagem GMAW por Curto-Circuito*. In: XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1996, Blumenau/SC. Anais do XXII Encontro

Nacional de Tecnologia da Soldagem. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, p. 187-196.

Gülenç, B., Develi, K., Kahraman, N., Durgutlu, A. (2005) *Experimental study of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in MIG welding of austenitic stainless steel*. International Journal of Hydrogen Energy, v. 30, p. 1475-1481.

Hermans J. M., Ouden G. Den. (1999) *Process Behavior And Stability In Short Circuit Gas Metal Arc Welding*. Welding Research Supplement, p. 137-141.

Hettes, F.J., Ketron, D. L. (1998) *Evaluation of Surface Preparation methods on Porosity Formation in Aluminum GMAW*. Trends in Welding Research, June, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, p. 368-373.

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

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

Kang, M.J., Kim, Y., Ahn, S., Rhee, S. (2003) *Spatter Rate Estimation In The Short-Circuit Transfer Region Of MIG/MAG*. Welding Journal, 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, Volume 215, nº 2, p. 195-205.

Lincoln Electric Company. (2015) *GMAW Welding Guide - Carbon, Low Alloy, and Stainless Steels and Aluminum*. http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf em 25/03/2016.

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

Liu, S., Siewert, T. A. (1989) *Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate*. Welding Journal, -, n.0, p.52-58.

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

Lowke J. J., Richard M., Jawad H., Anthony M. B. (1997) *Prediction of gas tungsten arc welding properties in mixtures of argon and hydrogen*. IEEE Trans Plasma Sci. p.925–930.

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

- Modenesi, P. J., Marques, P. V., Santos D. B. (2006) *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. Belo Horizonte – MG, 81p.
- Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q., (2009) *Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. Belo Horizonte – MG, 153p.
- Moino, H. F., Fiorello, V. (1984) *Curso de Tecnologia de Fabricação*. São Paulo – SP.
- Moreira, H. (2008) *Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – SP, USP, 84p.
- NACE International. (2015) Petroleum, petrochemical, and natural gas industries — Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production: ANSI/NACE MR0175/ISO 15156-1:2015. Estados Unidos.
- Resende, A. (2007) *Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 126p.
- Norrish, J. (1992) *Advanced Welding Process*. 1. ed. London: IOP Publishing Ltd, 375p.
- Novais, P. R. S. (2010) *Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções* - Contribuição técnica nº 9. Associação Brasileira de Construção Mecânica (ABCM), 17p.
- Okumura, T., Taniguchi C. (1982) *Engenharia de Soldagem e Aplicações*. Rio de Janeiro: LTC, 461p.
- 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.
- Ponomarev, V., Scotti, A. (2008) *Soldagem MIG / MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. São Paulo - SP: Artliber Editora, 284p.
- Resende, A. (2007) *Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 126p.
- 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, Volume 10, nº 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, Volume 12, nº 5, p. 460-466.
- Santos, R. P. G., Scotti, A. (2009) *Análise da Geração de Respingo para o processo FCAW e o processo GMAW*. In: 19º Posmec-Simpósio do Programa de Pós-graduação, 2009, Uberlândia – MG. 19º Posmec-Simpósio do Programa de Pós-graduação, 2p.
- Silva, A. V., Marques, P. V., Modenesi, P. J. (1994) *Uma Avaliação da Transferência por Curto-Circuito GMAW*. In: XX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Contagem – MG. Anais do XX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, p. 593-607.
- Silva, C. L. M., Scotti, A. (2002) *Avaliação de Geração de Porosidade em Ligas de Alumínio Soldadas pelas Técnicas MIG-P E MIG-PPT*. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa – PB, 3p.
- Silva, C. R., Ferraresi, V. A., Scotti, A. (2000) *A quality and cost approach for welding process selection*. Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, vol. xxii, no. 3, p. 389-398.
- 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*. 2011. 11f. Soldag. insp. São Paulo, Vol. 16, No. 1, p.22-32.
- Stenbacka, N., Persson, K. A. (1989) *Shielding gases for gas metal arc welding*. Welding Journal. Volume 68, nº 11, p. 41-47.
- Suban, M., Tusek, J. (2001) *Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used*. Journal of Materials Processing Technology, Ljubljana - Slovenia, n.119, p.185-192.
- Suban, M., Tusek, J. (2003) *Methods for the Determination of Arc Stability*. Journal of Materials Processing Technology, p. 430-437.
- Taniguchi, C. (1982) *Princípios de Engenharia de Soldagem*. 5. ed. São Paulo - SP: EDUSP-DEN.
- Tatagiba, L. C. S., Gonçalves, R. B., Paranhos, R. P. da R. (2012) *Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG-MAG*. Revista Soldagem e Inspeção, p.218-228.
- Tatagiba, L. C. S., (2015) *Formulação de Gases de Proteção com Adições de Gases Redutores para a Soldagem Mig-Mag*. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 170p.

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

Teubel, G. P. (1980) *A soldagem elétrica sob gás protetor – parte I e II*, Apostila da UDS, p.16-22.

Tusek, 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. n. 25, p. 369 – 376.

Weiss, A. (2010) *Soldagem*. Curitiba - PR: Editora do Livro Técnico, 128p.