

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Alexandre Arthuzo

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
SOLDAGEM NO PROCESSO “GMAW” ROBOTIZADO**

Taubaté – SP

2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Alexandre Arthuzo

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
SOLDAGEM NO PROCESSO “GMAW” ROBOTIZADO**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre, pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica de Taubaté do Departamento de Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Tecnologia de Materiais e Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Taubaté – SP

2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Arthuzo, Alexandre, 2006

Estudo da influência dos parâmetros de soldagem no processo
"GMAW" robotizado / Alexandre Arthuzo. Taubaté, 2006.

Orientador: José Rubens de Camargo.

Dissertação de mestrado – Universidade de Taubaté, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

ALEXANDRE ARTHUZO
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO PROCESSO
“GMAW” ROBOTIZADO

Dissertação apresentada para obtenção de Título de Mestre pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, Área de Concentração: Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação.

Data: 02 / 12 / 2006

Resultado: APROVADO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Universidade UNESP

Assinatura _____

DEDICATÓRIA

A Deus.

“E a toda minha família que me ajudou ao longo deste curso, também a minha namorada e aos amigos que sempre estiveram presentes.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a DEUS que me permitiu a conclusão deste curso.

Ao professor José Rubens Camargo, meu orientador, que me ajudou na elaboração e conclusão deste trabalho.

Minha família e namorada que compreendeu todos os momentos difíceis, de correria e muita ansiedade.

Para todos os amigos da Turma (Mestrado de Engenharia Mecânica), saudades das conversas, risadas, correria em época de provas e trabalhos, e principalmente das amizades conquistadas ao longo desses cinco anos.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração e conclusão deste trabalho.

Muito Obrigado!

Resumo

O ajuste dos parâmetros do processo de solda "GMAW" robotizado usado para componentes da indústria automobilística, se realizado de forma indevida, pode comprometer a qualidade do produto, seja no aspecto de resistência da junta, seja no aspecto meramente estético. Entre os diversos parâmetros que influenciam na prevenção dos defeitos em juntas soldadas por tal processo, pode-se citar a tensão e a corrente elétrica, a velocidade de soldagem, o gás de proteção, a velocidade do arame, a extensão do arame (stickout), o ângulo da tocha, a inclinação de soldagem, a posição do eletrodo, etc. Este trabalho tem como objetivo associar diferentes ajustes de parâmetros de solda em junta sobreposta com o resultado da qualidade da solda obtida. Para a soldagem dos corpos-de-prova, as chapas foram fixadas através de um dispositivo especial com grampos que garantiram a posição das mesmas, e não houve qualquer tipo de preparação prévia da superfície. Diferentes ajustes foram adotados para o ângulo da tocha, a inclinação de soldagem, a extensão e a posição do eletrodo, e a folga entre as chapas, parâmetros estes escolhidos por serem fortemente influenciáveis pelo conhecimento do operador. Para caracterização das soldas, os defeitos foram quantificados, sendo as amostras, analisadas visualmente e preparadas para avaliação por metalográfica e dimensional. Os resultados dos testes mostraram que em todas as condições de ajuste do processo pode-se obter um resultado dentro da faixa especificada na norma Toyota TSH (2005). Após uma análise abrangente das condições estudadas, concluiu-se que os melhores resultados foram: Inclinação de soldagem a -30° , ângulo da tocha a 90° , extensão do eletrodo 10 mm, posição do eletrodo 2 mm e folga entre chapas 1 mm / 45° .

Palavras-chave: GMAW Robotizado, Soldagem, Parâmetros de soldagem, Macrografia.

Abstract

The unsuitable parameters setting in the robotized “GMAW” welding process, used in the auto industry, can compromise the product quality, either in the aspect of the joint strength or simply the aesthetic aspect. The proper choice of the working levels for process parameters such as the voltage, the electric current, the welding speed, the gas of protection, the wire speed, the extension of the wire (stick out), the angle of the torch, the inclination of welding, the position of the electrode, etc is understood as a key point for the prevention of the defects. The purpose of the present work was to associate the lap joint welding quality resulting from different settings of selected process parameters. During the welding trials, the specimens were firmly gripped in a special device to ensure a stable position. No surface preparation was applied prior to the welding. In this study, different settings of the angle of the torch, the inclination of welding, the extension of the electrode, the position of the electrode and the clearance between the plates were adopted, given the fact that such parameters levels are strongly influenced by the operator knowledge. For the welding characterization, the defects were quantified, being the samples visually analyzed and prepared for metallographically and dimensional analysis. The results of the tests led to the conclusion that the requirements of the Toyota TSH (2005) specification are met for all the employed process settings, and an extensive analysis of all the evaluated welding process settings has shown that the best choice would be: Inclination of welding -30° , angle of the torch 90° , extension of electrode 10 mm, position of electrode 2 mm and clearance between plates 1 mm/ 45° .

Key-words: GMAW Robotized, Welding, Welding Parameters, Macrograph.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região do arco na soldagem “GMAW”	22
Figura 2 - Diagrama do equipamento “GMAW”	26
Figura 3 - Arco pulsado	27
Figura 4 - Modos de transferência na soldagem	29
Figura 5 - Técnica de soldagem por arco aerossol (spray)	34
Figura 6 - Efeito da inclinação de trabalho na forma do cordão de solda	38
Figura 7 – Terminologia	40
Figura 8 - Corrente de soldagens típicas X alimentação de eletrodos de aço carbono	41
Figura 9 - Ângulos de posicionamento da tocha	42
Figura 10 - Representação da distância contato peça e da projeção do arame	43
Figura 11 - Instalação para soldagem “GMAW” mecanizado	44
Figura 12 - Alimentador de Arame para solda robotizada	45
Figura 13 - Regulagem automática do tamanho do arco em “GMAW”	48
Figura 14 - Efeito Pinch	49
Figura 15 - Tipos de fontes de arame	51
Figura 16 - Redução do nível de respingos com a redução do teor de CO ₂ no gás de proteção	55
Figura 17 - Contorno e penetração da solda para diversos gases de proteção	58
Figura 18 - Perfil da área penetrada	59
Figura 19 - Efeito da adição de oxigênio x dióxido de carbono à proteção de argônio	59
Figura 20 - Mordedura no pé da solda	64
Figura 21 - Porosidade do tipo agrupada	65

Figura 22 - Falta de penetração	66
Figura 23 - Ângulo da Tocha	71
Figura 24 - Inclinação de soldagem no processo "GMAW"	72
Figura 25 - Comprimento do eletrodo	73
Figura 26 - Posição do eletrodo	74
Figura 27 - Folga entre as chapas	74
Figura 28 - Garganta da solda	75
Figura 29 - Largura da solda	75
Figura 30 - Penetração da solda	75
Figura 31 - Macrografia de uma junta soldada	76
Figura 32 - Processo "GMAW" robotizado	78
Figura 33 - Avaliação da solda, penetração, garganta e largura	79
Figura 34 - Ângulo da Tocha	79
Figura 35 - Inclinação de Soldagem	79
Figura 36 - Extensão do eletrodo	79
Figura 37 - Posição do eletrodo	80
Figura 38 - Folga entre chapas	80
Figura 39 - Rotação da amostra a cada mudança de lixa	82
Figura 40 - Variação do ângulo da tocha para 30°	84
Figura 41 - Variação do ângulo da tocha para 45°	84
Figura 42 - Variação do ângulo da tocha para 60°	85
Figura 43 - Variação do ângulo da tocha para 90°	85
Figura 44 - Variação da garganta	86
Figura 45 - Variação da largura da solda	86

Figura 46 - Variação da penetração da solda	86
Figura 47 - Variação da inclinação da Solda para 30°	88
Figura 48 - Variação da inclinação da Solda para 10°	88
Figura 49 - Variação da inclinação da Solda para 0°	89
Figura 50 - Variação da inclinação da Solda para -10°	89
Figura 51 - Variação da inclinação da Solda para -30°	90
Figura 52 - Variação da garganta	90
Figura 53 - Variação da largura da solda	90
Figura 54 - Variação da penetração da solda	91
Figura 55 - Variação da extensão do eletrodo para 10 mm	92
Figura 56 - Variação da extensão do eletrodo para 15 mm	92
Figura 57 - Variação da extensão do eletrodo para 20 mm	93
Figura 58 - Variação da extensão do eletrodo para 25 mm	93
Figura 59 - Variação da garganta	94
Figura 60 - Variação da largura da solda	94
Figura 61 - Variação da penetração da solda	94
Figura 62 - Variação da Posição do Eletrodo para 2 mm	96
Figura 63 - Variação da Posição do Eletrodo para 1 mm	96
Figura 64 - Variação da Posição do Eletrodo para 0 mm	97
Figura 65 - Variação da Posição do Eletrodo para -1 mm	97
Figura 66 - Variação da Posição do Eletrodo para -2 mm	98
Figura 67 - Variação da garganta	98
Figura 68 - Variação da largura da solda	98
Figura 69 - Variação da penetração da solda	99

Figura 70 - Variação da folga entre chapas para 1 mm	100
Figura 71 - Variação da folga entre chapas para 2 mm	101
Figura 72 - Variação da folga entre chapas para 1 mm	101
Figura 73 - Variação da folga entre chapas para 2 mm	102
Figura 74 - Variação da folga entre chapas para 1 mm	102
Figura 75 - Variação da folga entre chapas para 2 mm	103
Figura 76 - Variação da garganta (1 mm)	103
Figura 77 - Variação da largura da solda (1 mm)	104
Figura 78 - Variação da penetração da solda (1 mm)	104
Figura 79 - Variação da garganta (2 mm)	104
Figura 80 - Variação da largura da solda (2 mm)	104
Figura 81 - Variação da penetração da solda (2 mm)	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação para eletrodos para soldagem “GMAW”	53
Tabela 2 - Principais gases utilizados na soldagem	56
Tabela 3 - Possíveis causas e ações para fusão incompleta	64
Tabela 4 - Possíveis causas e ações para mordedura	65
Tabela 5 - Possíveis causas e ações para falta de penetração	66
Tabela 6 - Condições de Soldagem	80

SUMÁRIO

1 Introdução	18
2 Revisão Bibliográfica	22
2.1 Gas Metal Arc Welding (GMAW)	22
2.1.1 Vantagens e Limitações	23
2.2 Fundamentos do Processo (GMAW)	25
2.2.1 Princípios de operação	25
2.2.2 Particularidades do processo de soldagem MIG pulsado	27
2.3 Mecanismos de Transferência do Metal	28
2.3.1 Transferência por Curto Circuito	30
2.3.2 Transferência Globular	31
2.3.3 Transferência Spray	33
2.4 Variáveis do Processo (GMAW)	35
2.4.1 Polaridade	36
2.4.2 Posição da Junta a ser Soldada	37
2.4.3 Diâmetro do Eletrodo	38
2.5 Parâmetros de Soldagem	39
2.5.1 Tensão de soldagem	39
2.5.2 Corrente de Soldagem	40
2.5.3 Velocidade de Soldagem	41
2.5.4 Ângulo de inclinação da tocha de soldagem	42
2.5.5 Distância entre bico de contato e o metal de base (DCP)	43
2.6 Equipamentos	44

2.6.1 Alimentador de Arame	44
2.6.2 Controle de Soldagem	45
2.6.3 Fontes de Energia	46
2.6.4 Regulador do Gás de Proteção	50
2.6.5 Fontes de Arame	50
2.6.6 Consumíveis	51
2.6.7 Eletrodos	52
2.7 Gases de Proteção	53
2.7.1 Função	53
2.7.2 Efeitos	54
2.7.3 Gases de Proteção Inertes	57
2.7.4 Adições de Oxigênio e CO ₂ ao Argônio e Hélio	58
2.7.5 Dióxido de Carbono	60
2.7.6 Seleção de Variáveis	60
2.8 Inspeção e Qualidade da Solda	61
2.8.1 Fragilização por Hidrogênio	61
2.8.2 Contaminação por Oxigênio e Nitrogênio	62
2.8.3 Limpeza	63
2.8.4 Fusão Incompleta	63
2.8.5 Descontinuidade da Solda	64
2.9 Soldagem MAG Manual	67
2.10 Soldagem MAG Robotizado	67
2.10.1 Variações de parâmetros em Soldagem MAG Robotizada	69
2.10.1.1 Tochas de Soldagem	69

2.10.1.2 Ângulo da Tocha (β)	71
2.10.1.3 Inclinação de Soldagem	72
2.10.1.4 Comprimento do Eletrodo ou Stickout	73
2.10.1.5 Posição do eletrodo	73
2.10.1.6 Folga entre as chapas	74
2.11 Norma e especificação Qualidade	74
2.11.1 Garganta	74
2.11.2 Largura da solda	75
2.11.3 Penetração	75
2.12 Macrografia	76
3 Proposição	77
4 Metodologia experimental	78
4.1 Materiais	78
4.2 Métodos	78
4.3 Metalografia: Preparação de Amostras e Análise quantitativa	81
4.3.1 Materiais e Equipamentos	81
4.3.2 Preparação de Amostras	81
4.3.2.1 Corte	81
4.3.2.2 Lixamento	82
4.3.2.3 Polimento	82
4.3.2.4 Ataque Químico	83
4.3.3 Análise Quantitativa	83
5 Resultados e Discussões	84
5.1 Resultados obtidos para Ângulo da Tocha	84

5.2 Resultados obtidos para Inclinação de Soldagem	87
5.3 Resultados obtidos para Extensão do Eletrodo	92
5.4 Resultados obtidos para Posição do Eletrodo	95
5.5 Resultados obtidos para Folga entre Chapas	100
6 Conclusões	107
Referências	108

1 INTRODUÇÃO

Com a introdução do processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), popularmente conhecido como TIG, tornou-se possível soldar alumínio e aço inoxidável com facilidade e com um alto grau de qualidade. Entretanto, o GTAW é um processo lento e a demanda por uma alta taxa de produção levou ao desenvolvimento da GMAW (Gas Metal Arc Welding), no qual o eletrodo não consumível de tungstênio do processo GTAW é substituído por um eletrodo consumível de pequeno diâmetro e de composição química compatível com o metal de base. Empregando-se o processo GMAW (MIG/MAG), é possível unir todos os metais para os quais já existam eletrodos no mercado. Como inicialmente o processo era principalmente utilizado para soldar alumínio e aço inoxidável com a proteção de um gás inerte, ele ficou mais conhecido como MIG (metal inert gas). Ainda um outro termo para o processo com proteção de gás ativo é MAG (metal active gas). Apesar destas terminologias especiais, todas as variações deste processo podem ser enquadradas como GMAW (FROME, 2006).

A soldagem é hoje um dos processos de fabricação mais importantes e populares para a união de materiais metálicos (ALMENDRA et al., 1997). A garantia de sua qualidade requer, no entanto, em determinadas aplicações, avaliações e qualificações da junta soldada (AWS, 1988). A inspeção e a aceitabilidade de determinada solda deve atender a critérios pré-estabelecidos, tais como em normas específicas (COSTA et al, 1998). Nos países desenvolvidos, onde a qualidade do produto é fator determinante da sua aceitabilidade no mercado, o desenvolvimento de normas, inspeção e aprovação do produto tornam-se indispensáveis (AWS, 1980).

O processo de soldagem é bastante antigo e comum na maioria das indústrias. Apesar da evolução das técnicas, ainda existe um número elevado de processos que dependem da experiência do operador no ajuste dos parâmetros. Estes parâmetros são importantes e estão relacionados com defeitos e dificuldades comuns em processos de soldagem: má aderência do cordão de solda, porosidades, mordeduras, falta de penetração, entre outras (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Atualmente para as empresas se manterem no mercado devem entregar aos clientes produtos cada vez mais inovadores, com alta qualidade e baixo custo e que os satisfaçam cada vez mais. O que as empresas vêm fazendo para alcançar este alvo é realizar experimentos na fase de desenvolvimento do produto e nos processos de fabricação (TAGUCHI, 1993).

O mercado brasileiro da soldagem, porém, não apresenta o mesmo comportamento, pois não se trata de um país que desenvolva ou aplique a alta tecnologia da soldagem em larga escala (GOHR, 2004 ; MORAES, 2006), como os países da Europa, EUA e Japão, que são grandes centros de desenvolvimento tecnológico. De fato, no Brasil, estudos revelam tendências de redução anual de 2% a 3% no mercado do Eletrodo Revestido e de incremento anual de 15% a 20% para tecnologias mais atuais, como o MIG/MAG (GONÇALVES E SILVA, 2005).

O processo de soldagem MAG (Metal Active Gas) é bastante versátil. Algumas de suas principais vantagens são: taxa de deposição maior que a de soldagem com eletrodo revestido, menos gás e fumaça na soldagem, alta versatilidade, larga capacidade de aplicação, além de poder ser aplicado em uma faixa ampla de espessuras e materiais (AWS, 1999). O uso do processo MAG é atualmente o método mais utilizado na Europa Ocidental, U.S.A e Japão. Isto ocorre

dentre outras coisas, devido a sua alta produtividade e facilidade de automação (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Quaisquer irregularidades podem ser corrigidas, através da seleção correta dos parâmetros que tem alguma influência sobre estas (SCOTTI, 1991). A importância de estudar este assunto mais profundamente está relacionada a redução de defeitos nas soldas devido à possibilidade de má formação dos cordões (PEREIRA; FERRARESI, 2001).

No processo de soldagem MAG Robotizado, uma grande variedade de defeitos podem aparecer no cordão de solda e normalmente estão associados às várias causas, tais como: inclinação da tocha, folgas entre as chapas, posição inicial do arame e a extensão do arame em relação à peça dos materiais soldados, etc (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Na indústria automobilística, é importante observar que a influência das variações dos parâmetros de solda em componentes soldados pode comprometer a qualidade do produto e várias soldas de segurança que afetam diretamente o bom funcionamento do veículo e o bem estar do usuário (PEREIRA, 2001).

Desta forma, o presente trabalho está sendo proposto um estudo sobre a influência de 5 parâmetros de soldagem: inclinação da tocha, folga entre as chapas, posição inicial do arame, extensão do arame e ângulo da tocha. Objetiva-se a obtenção de dados qualitativos e quantitativos para estabelecer quais os melhores parâmetros avaliados que podem variar sem afetar a qualidade do cordão de solda. Neste trabalho, os parâmetros fixados foram: a corrente, a voltagem, a velocidade de soldagem, o tipo do gás (80% Ar + 20% CO₂), o fluxo de gás e o tipo do arame.

Os parâmetros estudados, que têm grande possibilidade de influência operacional, ao processo de fabricação de campo automobilístico por essa razão de que quantificar esses valores para minimizar o erro no processo.

O presente trabalho para o seu melhor entendimento foi organizado nos seguintes capítulos:

- I. Introdução
- II. Revisão Bibliográfica
- III. Proposição
- IV. Metodologia Experimental
- V. Resultados e Discussões
- VI. Conclusões
- VII. Referências

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Gas Metal Arc Welding – GMAW

Gas Metal Arc Welding - GMAW é um processo de soldagem a arco, que utiliza um arco entre uma alimentação contínua de metal e a poça de fusão. Região do arco na soldagem GMAW (Figura 1). Esse processo utiliza como proteção para a poça de soldagem, contra contaminação do ar externo, uma fonte externa de gás de proteção (BRACARENSE, 2003).

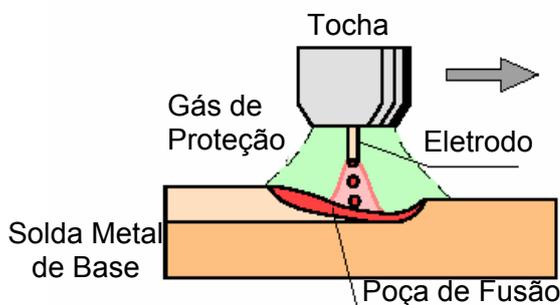


Figura 1 - Região do arco na soldagem GMAW (MODENESI, 2000)

A concepção básica do GMAW iniciou-se em 1920, entretanto, somente se tornou comercial após 1948 (FORTES, 2004).

Inicialmente, este era considerado ser, fundamentalmente, um processo de alta densidade de corrente, pequenos diâmetros de eletrodos de metal nu onde se utiliza um gás inerte para proteção. Sua primeira aplicação foi na soldagem de alumínio. Por causa dessa característica, o processo era conhecido como Metal Inert Gas - MIG, utilizando o calor de um arco elétrico entre um eletrodo nu alimentado continuamente e o metal base para formar a solda. A proteção do arco e da poça de solda vem inteiramente do gás. No caso do processo de soldagem MIG o gás pode ser composto por : Argônio, Hélio, Argônio +1% de O₂; Argônio + 3% de O₂. Quando o gás utilizado não for inerte, o processo é chamado de **METAL ACTIVE GAS (MAG)**. Neste caso os gases utilizados podem ser: CO₂; CO₂ + 5 a 10% de O₂;

Argônio + 15 a 30% de CO₂; Argônio + 5 a 15% de CO₂; Argônio + 25 a 30% de N₂. Evolução subsequente do processo incluiu a soldagem com baixas densidades de corrente e corrente pulsada, aplicação em uma vasta faixa de materiais e emprego de gás ativo ou uma mistura de gases. Este último desenvolvimento levou à aceitação formal do termo Gas Metal Arc Welding (GMAW) para denominação do processo, devido aos gases inertes e ativos serem utilizados. Uma variação do processo GMAW utiliza um eletrodo tubular onde pós-metálicos compõem o centro do arame. Tais eletrodos requerem uma proteção de gás para proteger a poção de fusão da contaminação atmosférica. O processo de soldagem por arame tubular é considerado um segmento do processo de soldagem GMAW pela sociedade americana de soldagem (AWS). Associações estrangeiras podem agrupar este processo de forma diferente (BRACARENSE, 2003).

GMAW pode ser utilizado nos modos automático, semi-automático e mecanizado. Todos os metais comercialmente importantes, tais como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldados em todas as posições de soldagem através da escolha apropriada de gás de proteção, de eletrodos e das variáveis de soldagem (PEIXOTO, 2004).

2.1.1 Vantagens e Limitações

Como vantagem e limitações do processo GMAW (MIG/MAG) pode-se enumerar as seguintes características (QUITES, 1979; STREET, 1990; AWS, 1991; SADLER, 1999; NORRISH, 1992; WAINER, 1992; ALCAN, 1993; MACHADO, 1996):

Vantagens :

- Versatilidade de soldagem em todas as posições e possibilidade de adaptação à automação;
- Alta taxa de deposição devido à elevada densidade de corrente possível de ser aplicada a (300 A/mm^2), o que corresponde até 10 vezes à densidade empregada no eletrodo revestido;
- Ampla faixa de aplicação em diferentes ligas e espessuras;
- Possibilidade de elevadas velocidades de soldagem bem maiores que outros processos como o eletrodo revestido (ER), que torna o processo MIG/MAG o mais atrativo industrialmente;
- Alimentação contínua do eletrodo nu, não formação de escória (menor tempo de limpeza) e reduzido nível de hidrogênio aportado (na ordem de 5ml/100g de metal).

Limitações :

Como limitação do processo pode-se enumerar: QUITES, 1979; STREET, 1990; AWS, 1991; SADLER, 1999; NORRISH, 1992; WAINER, 1992; ALCAN, 1993; MACHADO, 1996):

- Alta velocidade de resfriamento (ausência de escória) propiciamento a tendência ao surgimento de trincas;
- Investimento inicial em equipamento mais alto, quando comparado ao processo com eletrodo revestido (ER);
- Grande emissão de raios ultravioleta e produção de ozônio (em função da baixa produção de fumos – os fumos servem de barreira à emissão dos raios para a vizinhança do arco);
- O equipamento de soldagem é mais complexo;

- O arco deve estar protegido de correntes de ar que possam dispersar o gás de proteção. Isto limita a soldagem em campo;
- O processo resulta em altos níveis de radiação e calor, o que pode resultar na resistência do operador ao processo;
- O processo GMAW apresenta maior dificuldade de utilização em locais difíceis de alcançar porque a tocha de soldagem é maior em relação a outros processos, além da tocha ter de estar perto da junta a ser soldada para assegurar proteção suficiente (INÊS, 2006).

As vantagens fazem do processo particularmente bem adequado para alta produção e soldagem automatizada. Isto se tornou evidente com o advento da utilização de robôs na produção, onde GMAW tem sido o processo mais utilizado (FORTES, 2004).

2.2 Fundamentos do Processo (GMAW)

2.2.1 Princípios de Operação

O processo GMAW incorpora alimentação automática de um eletrodo consumível contínuo que é protegido por um suprimento externo de gás. Depois da regulagem inicial feita pelo operador, o equipamento auto-regula as características do arco automaticamente. Conseqüentemente, os únicos controles manuais necessários pelo soldador para operação semi- automática são a velocidade, a direção, a posição da tocha e a extensão do eletrodo na soldagem. Com equipamento e regulagem adequada, o comprimento do arco e a corrente (velocidade de alimentação do arame) são automaticamente mantidos. O equipamento necessário para GMAW é mostrado na Figura 2. Os componentes do

equipamento básico são a tocha de soldagem, a armação de cabos, a unidade alimentadora de eletrodo, a fonte de energia e a fonte de gás (MODENESI, 2000).

A tocha guia o eletrodo consumível e conduz a corrente elétrica e o gás de proteção para a área de trabalho, deste modo fornecendo a energia para estabelecer, manter o arco e fundir o eletrodo, fornecendo ainda a proteção da atmosfera necessária. Duas combinações de alimentadores de eletrodo e fontes de energia são utilizadas para alcançar a auto-regulagem do comprimento do arco. Mais comumente esta regulagem consiste de uma fonte de voltagem constante (caracteristicamente fornecendo uma curva voltagem x corrente aplainada) em conjunção com uma unidade de alimentação de eletrodo de velocidade constante. Por outro lado, uma fonte de corrente constante origina em uma curva inclinada de voltagem x corrente sendo a unidade de alimentação de eletrodo controlada pela voltagem do arco (BRACARENSE, 2003).

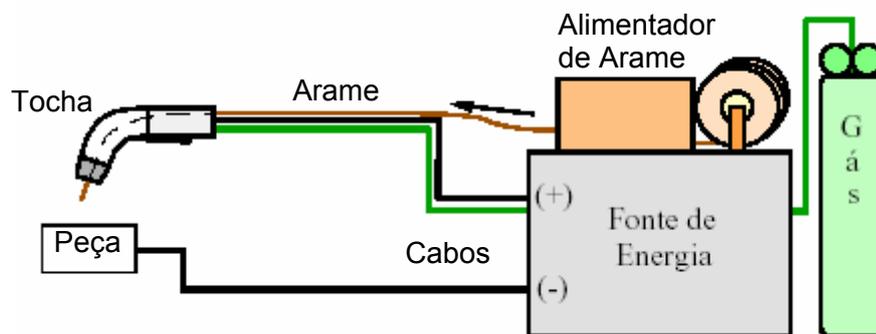


Figura 2 - Diagrama do equipamento GMAW (MODENESI, 2000)

Na soldagem GMAW convencional é usual trabalhar-se com fonte de tensão constante em conjunto com um alimentador de arame de velocidade constante (MODENESI, 2005). Mudanças na posição da tocha podem ocasionar mudanças na corrente de soldagem que levem exatamente à mudança na extensão (stick out) do eletrodo. Por exemplo, um aumento na extensão do eletrodo produzido pelo

afastamento da tocha reduz a corrente que sai da fonte, entretanto mantendo a mesma resistência de aquecimento do eletrodo. No sistema alternativo, a auto-regulagem resulta quando flutuações na voltagem reajustam circuitos de controle do alimentador, que mudam apropriadamente a velocidade da alimentação de arame. Em alguns casos, (soldagem de alumínio por exemplo) pode ser preferível desviar destas combinações padrões e se utilizar uma combinação de uma fonte de corrente constante com uma alimentação corrente de arame. Esta combinação origina somente um pequeno grau de auto-regulagem automática, e entretanto requer mais da habilidade do operador em soldagem semi-automática. Entretanto, alguns usuários pensam que esta combinação proporciona uma faixa de controle da energia do arco (corrente), que pode ser importante para vencer a alta condutividade de metais como o alumínio.

2.2.2 Particularidades do processo de soldagem MIG pulsado

Os controladores de Arco Pulsado constituem um dispositivo eletrônico bastante utilizado nas fontes. Estes circuitos controlam a frequência e a grandeza da corrente contínua a fim de obter duas faixas de correntes, chamadas corrente de pico (I_p) e corrente de base (I_b), como mostra a Figura 3.

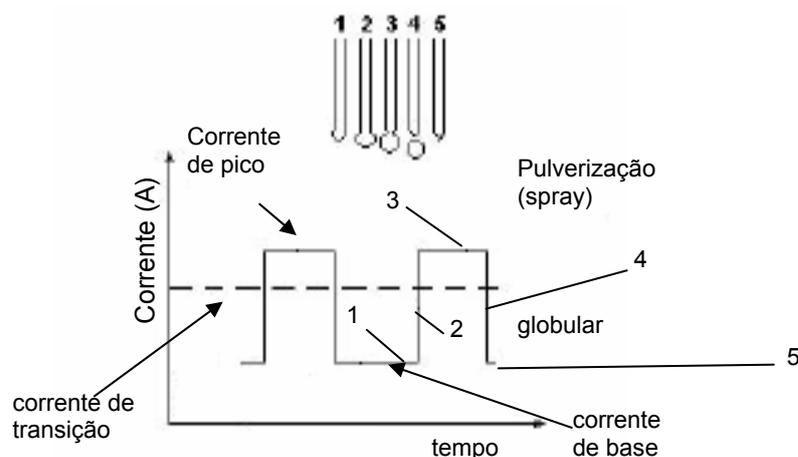


Figura 3 - Arco pulsado (BONANNI; COSTA, 2004)

Na prática, a corrente de pico é responsável pela fusão do material, enquanto a corrente de base é responsável pela manutenção da temperatura da poça de fusão. Esta variação de valores de correntes ao longo do tempo propicia condições de aumento de produtividade para a soldagem de peças de espessuras finas, pois durante os pulsos de alta corrente obtém-se o modo de transferência por *spray* enquanto se mantém um nível de corrente média abaixo da corrente normal de transição, provocando baixos níveis de calor, como relatam (GRAIG,1987; COLLARD,1988; KIM; EAGAR, 1993; WEBER, 1982).

Com o intuito de conciliarem as vantagens do curto-circuito (soldagem de chapas finas e fora de posição plana) e as vantagens da goticular (boa estabilidade, bom aspecto superficial do cordão de solda e poucos respingos gerados), foi concebida uma variação do processo MIG/MAG a partir da pulsação da corrente de soldagem, denominada de MIG/MAG pulsado. Nesta, a fonte de energia fornece dois níveis de corrente: corrente de base e corrente de pico. A corrente de base possui um valor abaixo da corrente de transição, e é utilizada para manter o arco aberto e não provocar a transferência metálica (apesar de ocorrer fusão da extremidade do arame). Já a intensidade da corrente de pico deve ser alta o suficiente (acima da corrente de transição), durante um determinado tempo (tempo de pico), para permitir a formação e destacamento das gotas, e projetá-las através do arco (GONÇALVES; MIRANDA; PONOMAREV, 2006).

2.3 Mecanismos de Transferência do Metal

As características do processo GMAW, são melhores descritas em termos de três meios básicos sob os quais o metal é transferido do eletrodo para a peça de trabalho (Figura 4). Estes meios são: transferência por curto circuito, transferência

globular e transferência spray.

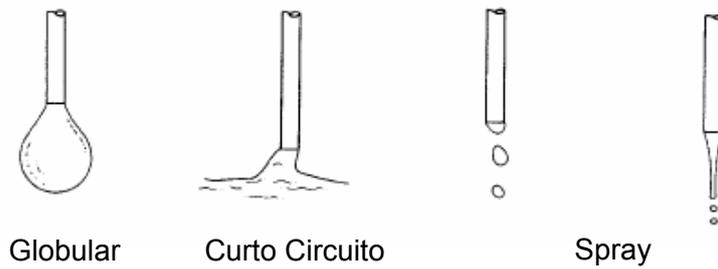


Figura 4 - Modos de transferência na soldagem GMAW (MODENESI, 2000)

O tipo de transferência é determinado por um grande número de fatores. Os que mais influenciam são:

- Magnitude e tipo de corrente de soldagem
- Diâmetro do eletrodo
- Composição do eletrodo
- Extensão do eletrodo
- Proteção de gás

O modo de transferência influencia fortemente características operacionais do processo GMAW como a sua estabilidade, o nível de respingos, o formato do cordão e sua regularidade e a capacidade de fundir o metal de base. Como a forma de transferência obtida no processo GMAW depende dos parâmetros de soldagem e é muito sensível ao seu ajuste, a seleção adequada destes é fundamental para uma soldagem adequada com este processo (MODENESI, 2002).

A eficiência do MIG/MAG é muito dependente do tipo de transferência metálica que ocorre da ponta do eletrodo para a poça de fusão, e nem sempre um determinado tipo de transferência pode conseguir as características a elevada produtividade, a boa qualidade da solda produzida e a versatilidade (AWS, 1991; NORRISH; RICHARDSON, 1988).

O modo pelo qual o material é transferido no arco, determina: a estabilidade do processo, a possibilidade de soldagem em várias posições, a quantidade de respingos gerada, a qualidade e geometria da solda e a aparência superficial do cordão de solda (NORRISH; RICHARDSON, 1988; NORRISH, 1992; STENBACKA; PERSSON, 1989).

2.3.1 Transferência por Curto Circuito

A transferência por curto-circuito engloba soldagem com baixas correntes e diâmetros de eletrodo. Este tipo de transferência produz uma poça de fusão pequena e de rápido resfriamento que é geralmente utilizada para unir chapas finas, para soldagem fora de posição e para fechar grandes aberturas de raiz. O metal é transferido do eletrodo para a peça somente durante o período quando o eletrodo está em contato com a poça de fusão. Nenhum metal é transferido através do arco.

O eletrodo toca a poça fundida numa faixa de aproximadamente 20 a 200 curtos circuitos em um segundo (MODENESI, 2002). A seqüência de transferência metálica na soldagem é em função da corrente e voltagem. Quando o arame toca o metal de solda, a corrente aumenta. A taxa em que a corrente aumenta deve ser alta o suficiente de modo a aquecer o eletrodo e promover transferência metálica, contudo baixa o suficiente para minimizar respingos causados pela separação violenta da gota de metal. Esta taxa de aumento da corrente é controlada pela indutância da fonte de energia.

A regulagem de indutância ótima depende da resistência elétrica do circuito de soldagem e da temperatura de fusão do eletrodo. Quando o arco é estabelecido, o arame funde na ponta e é empurrado em direção a um novo curto circuito. A voltagem em aberto deve ser baixa de modo que a gota de metal fundido não se

transfira para o metal base até que toque o metal base. A energia para manutenção do arco é parcialmente provida pela energia armazenada no indutor no período de curto circuito.

Embora a transferência ocorra somente durante o curto circuito, composição do gás de proteção tem efeito importante na tensão superficial do metal fundido. Mudanças na composição do gás podem afetar o tamanho da gota e a duração do curto circuito. Adicionalmente, o tipo de gás influencia a característica de operação. Dióxido de carbono geralmente produz altas quantidades de respingos comparados com gases inertes, mas também produz uma penetração mais alta (MODENESI, 2002). Para encontrar uma boa combinação entre respingos e penetração, misturas de CO₂ e argônio são freqüentemente utilizadas na soldagem de aços carbono e baixa liga. Adições de hélio ao argônio aumentam a penetração em metais não ferrosos (SILVA, 2006).

2.3.2 Transferência Globular

Com eletrodo positivo (DCEP), a transferência globular acontece quando a corrente é relativamente baixa, independente do tipo de gás de proteção. Entretanto, com dióxido de carbono e hélio, este tipo de transferência ocorre em toda a faixa de corrente. Transferência globular é caracterizada por uma gota de diâmetro maior que o do eletrodo. Com o aumento do tamanho da gota, o seu peso aumenta e acaba por ocasionar a sua separação do arame, e a gota de metal líquido se transfere para a poça de fusão pela ação da gravidade. Em correntes médias, levemente maiores que as utilizadas em transferência de curto circuito, transferência globular diretamente axial pode ser alcançada com a utilização de proteção inerte. Se o comprimento do arco é muito pequeno (baixa voltagem), a gota em crescimento

pode alcançar a peça, se superaquecer e desintegrar, produzindo respingos. O arco deve então ser longo o suficiente para assegurar o destacamento da gota antes que esta tenha contato com a poça de fusão. Entretanto, uma solda feita utilizando alta voltagem é provável de não ser aceita devido à falta de fusão, penetração insuficiente e reforço excessivo. Isto limita grandemente o uso de transferência globular em aplicações na produção (MODENESI, 2005).

Proteção por dióxido de carbono resulta em uma transferência globular com direção aleatória, quando a corrente de soldagem e voltagem estão significativamente acima da faixa de curto circuito. O momento da transferência axial é governado por forças eletromagnéticas, geradas pela corrente de soldagem agindo sobre a ponta fundida. O mais importante destes são os "pinch" eletromagnético (P) e a reação anódica (R). A magnitude da força (P) é função direta da corrente de soldagem e do diâmetro do eletrodo e é normalmente responsável pelo destacamento da gota. Com proteção de CO₂, a corrente de soldagem é conduzida através da gota fundida e a ponta do eletrodo não é envolvida pelo plasma.

Fotografias de alta velocidade mostram que o arco move sobre a superfície da gota fundida e a peça de trabalho, pois a força R tende a suportar a gota. A gota fundida cresce até que ela se destaca por curto circuito ou por gravidade (em alguns casos sem se romper). A situação mais favorável envolve a gota curto circuitando a coluna do arco e explodindo. Respingos podem entretanto ser severos, o que limita o uso do CO₂ para muitas aplicações comerciais (BRACARENSE, 2004).

Não obstante, o CO₂ permanece sendo o gás mais utilizado para soldagem de aços doces. A razão para isto é que o problema de respingos pode ser reduzido significativamente por "enterro" do arco. Deste modo, a atmosfera do arco se torna uma mistura de gás e vapor de metal, permitindo que a transferência se torne quase

spray. As forças do arco são suficientes para manter a cavidade de depressão que captura a maioria do respingo. Esta técnica requer altas correntes de soldagem e resulta em penetração profunda. Entretanto, a menos que a velocidade de soldagem seja cuidadosamente controlada, isto pode resultar em reforço excessivo devido às tensões superficiais de soldagem (BRACARENSE, 2003).

2.3.3 Transferência Spray

Na transferência por spray, o metal se transfere como finas gotas sob a ação de forças eletromagnéticas do arco e independentemente da ação da gravidade. Esta forma de transferência ocorre na soldagem com misturas de proteção ricas em argônio e com valores elevados de corrente. Ela é muito estável e livre de respingos. Infelizmente, a necessidade de correntes elevadas torna difícil, ou impossível, a sua aplicação na soldagem fora da posição plana (a poça de fusão tende a ser muito grande e de difícil controle) ou de peças de pequena espessura (excesso de penetração) (MARQUES; MODENESI, 2000).

Dentre os processos de soldagem, o processo MIG/MAG tem se revelado como aquele de maior ascensão no ambiente industrial, decorrente de sua alta produtividade e excelente qualidade dos cordões de solda obtidos. Mais recentemente, o modo pulsado de soldagem aumentou, ainda mais, a faixa de utilização do processo, possibilitando a soldagem de chapas finas em todas as posições, através do modo de transferência por *spray*, onde cordões com aspectos mais homogêneos, arcos mais estáveis e pequena formação de respingos são obtidos (BONANNI; COSTA, 2004). Contudo, (DAVIES, 1996) e (DUTRA, 1996) mostram que, apesar dos benefícios trazidos pela utilização do modo pulsado, a complexa natureza deste e o alto grau de habilidade exigida, por parte dos

soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais, têm limitado, de maneira significativa, sua aceitação pelas indústrias de soldagem.

Aumentando-se a corrente e a tensão de soldagem ainda mais, a transferência de metal torna-se um verdadeiro arco em aerossol (*spray*). A corrente mínima à qual esse fenômeno ocorre é chamada corrente de transição. A Tabela II mostra valores típicos de corrente de transição para vários metais de adição e gases de proteção. Conforme é observado nessa tabela, a corrente de transição depende do diâmetro do arame e do gás de proteção. Entretanto, se o gás de proteção para soldar aços carbono contiver mais que cerca de 15% de dióxido de carbono (CO₂), não haverá transição de transferência globular para transferência por aerossol (FORTES, 2004).

A Figura 5 mostra a transferência fina e axial típica do arco em aerossol. As gotas que saem do arame são muito pequenas, proporcionando boa estabilidade ao arco. Curtos-circuitos são raros. Poucos respingos são associados com essa técnica de soldagem. A soldagem em aerossol pode produzir altas taxas de deposição do metal de solda. Essa técnica de soldagem é geralmente empregada para unir materiais de espessura de 2,4 mm e maiores. Exceto na soldagem de alumínio ou cobre, o processo de arco em aerossol fica geralmente restrito apenas à soldagem na posição plana por causa da grande poça de fusão. No entanto, aços carbono podem ser soldados fora de posição usando essa técnica com uma poça de fusão pequena, geralmente com arames de diâmetro 0,89 mm ou 1,10 mm.

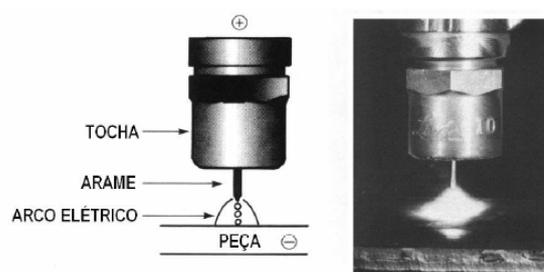


Figura 5 -Técnica de soldagem por arco aerossol (spray) (FORTES, 2004)

Uma variação da técnica de arco em aerossol é conhecida como soldagem pulsada em aerossol. Nessa técnica, a corrente é variada entre um valor alto e um baixo. O nível baixo de corrente fica abaixo da corrente de transição, enquanto que o nível alto fica bem dentro da faixa de arco em aerossol. O metal é transferido para a peça apenas durante o período de aplicação de corrente alta. Geralmente é transferida uma gota durante cada pulso de corrente alta.

2.4 Variáveis do Processo (GMAW)

A seguir são apresentadas algumas variáveis que afetam a penetração da solda, a geometria do leito e, conseqüentemente, as qualidades globais da solda:

- Polaridade;
- Posição da junta;
- Diâmetro dos eletrodos;

O conhecimento e controle destas variáveis são essenciais para a obtenção de soldas de qualidade satisfatória. Estas variáveis não são completamente independentes e mudanças em uma delas, requerem mudanças em uma ou mais das outras para produzir os resultados desejados. Habilidade considerável e experiência podem ser necessárias para seleção de parâmetros para cada aplicação. Os valores ótimos são afetados pelo tipo de metal de base, pela composição do eletrodo, pela posição de soldagem e pelos requisitos de qualidade. Então, não há uma mudança única nos parâmetros que leve a um resultado ótimo em cada caso (GIMENES; RAMALHO, 2006).

A GMAW, na sua versão semi-automática, o operador segura a tocha com a mão ligando ou desligando o sistema. Antes de abrir o arco, normalmente o circuito elétrico é ajustado no painel da fonte. Além do ajuste da tensão é também

necessário à escolha das outras variáveis de soldagem para controlar o processo a fim de se obter os resultados esperados. Estas variáveis são a velocidade de alimentação do eletrodo, a distância do bocal à peça, o *stickout*, a inclinação de trabalho do eletrodo, e o fluxo de gás. Essas variáveis requerem uma monitoração constante por parte do operador. A velocidade de soldagem, a posição de soldagem e o diâmetro do eletrodo também influenciam consideravelmente na geometria do cordão de solda (UNB, 2006).

2.4.1 Polaridade

O termo polaridade é usado para descrever a conexão elétrica da tocha de soldagem com relação aos terminais de corrente da saída da fonte de tensão. Quando a tocha é conectada ao terminal positivo da fonte, a polaridade é designada como DCEP (direct current electrode positive) ou polaridade inversa. Caso o terminal negativo seja conectado à tocha, a polaridade é designada como DCEN (direct current electrode negative) ou polaridade direta.

A grande maioria das aplicações utilizando GMAW emprega DCEP (direct current electrode positive) como polaridade. Esta condição leva a um arco estável, transferência metálica suave, baixa quantidade de respingos, boas características do leito e maior profundidade de penetração para uma vasta gama de correntes de soldagem.

A DCEN é raramente utilizada devido a transferência axial não ser possível sem modificações que não são aceitas comercialmente. DCEN tem uma vantagem de se obter alta taxa de fusão que não podem ser exploradas devido à transferência ser globular. Com aços, a transferência pode ser melhorada com a adição de um mínimo de 5% de oxigênio à proteção de argônio (neste caso ligas são requeridas

para compensar a oxidação) ou pelo tratamento do arame para torná-lo iônico (aumento de custo). Em ambos casos, a taxa de deposição cai, eliminando a única vantagem de inversão de polaridade. Entretanto, devido à alta taxa de deposição e reduzida penetração, DCEN tem ainda alguma utilização em operações de revestimento. Tentativas de se utilizar corrente alternada não foram bem sucedidas. A onda cíclica forma instabilidade no arco devido à tendência do arco em se extinguir quanto a corrente passa através do ponto zero. Arames especiais podem ser desenvolvidos para resolver o problema, porém o custo torna a técnica não econômica (BRACARENSE, 2003).

2.4.2 Posição da Junta a ser Soldada

A maioria das operações de soldagem com transferência por SPRAY são utilizadas nas soldagens nas posições horizontal e/ou plana. Enquanto com baixos níveis de energia e utilização de pulsos e curto circuito o GMAW pode ser utilizado em todas as posições de soldagem.

Para vencer a força da gravidade em soldagem vertical e sobre cabeça, pequenos diâmetros de eletrodos são utilizados, com transferência por curto circuito ou spray com arco direto pulsado. O baixo aporte de calor permite que o metal fundido resfrie rapidamente. Soldagem descendente é usualmente efetiva em folhas de metal quando soldando em posição plana, a inclinação da solda com respeito ao plano horizontal vai influenciar a forma do cordão de solda, penetração e velocidade de soldagem.

Posicionando-se juntas lineares com o eixo de soldagem a 15 graus da horizontal e soldando-se na posição descendente, o reforço de soldagem pode diminuir sobre as condições de soldagem que produziram reforço excessivo quando

o trabalho é feito em posição plana. Ao mesmo tempo a penetração é menor, o que é benéfico para a soldagem de folhas mais finas. Soldagem descendente afeta o contorno e penetração, como mostrado na Figura 6 (A). A poça de soldagem tende a escorrer na direção do eletrodo e pré-aquecer o metal de base. À medida que o ângulo de inclinação aumenta, acontece uma depressão na superfície média da solda, a penetração diminui e largura aumenta. Para o alumínio, a técnica descendente não é recomendada devido à perda da ação limpante e proteção inadequada.



Figura 6 - Efeito da inclinação de trabalho na forma do cordão de solda (BRACARENSE, 2003)

Soldagem ascendente afeta o contorno da zona de fusão e a superfície da solda, como ilustrado na Figura 6 (B). A força da gravidade causa o escorrimento da poça de fusão sobre o eletrodo. As bordas da solda perdem material que vai para o centro. À medida que o ângulo de inclinação aumenta, o reforço e a penetração aumentam e a largura da poça de fusão diminui. Os efeitos são opostos aos produzidos na soldagem descendente.

2.4.3 Diâmetro do Eletrodo

O diâmetro do eletrodo influencia a forma de cordão de solda. Quanto maior o diâmetro do arame, maior será a corrente necessária para a sua fusão. Correntes grandes produzem fusão adicional do eletrodo e depósitos maiores e mais fluidos. Altas correntes também originam altas taxas de deposição e grande penetração.

Entretanto nas posições vertical e sobre cabeça, menores diâmetros de arame são utilizados com baixas correntes de soldagem (BRACARENSE, 2003).

2.5 Parâmetros de Soldagem

A correta utilização do processo MIG/MAG dependerá do perfeito entendimento de como as diversas variáveis envolvidas na operação de soldagem podem influenciar a estabilidade do arco e a qualidade final do depósito. As principais influências dos parâmetros envolvidos na soldagem MIG/MAG serão colocadas de maneira simples, conforme abaixo relacionadas (QUITES, 1979; OKUMURA, 1991; RYAN, 1988; COSTA, 1995; MACHADO, 1996; DENNIS, 1997; ALTSHULLER, 1998; AICHELE, 2002).

2.5.1 Tensão de soldagem

- A tensão de soldagem influencia no insumo de calor e apresenta uma relação direta com o comprimento do arco e a largura do arco.
- Qualitativamente, para uma mesma corrente, uma tensão baixa provocará cordões mais estreitos e maior penetração, o oposto acontecendo para tensões mais altas, além da ocorrência de salpicos grosseiros.
- De uma maneira geral, tensões baixas favorecem a transferência por curto-circuito e em tensões mais altas haverá tendência à transferência no modo spray.
- Valores elevados de tensão podem propiciar o aparecimento de porosidade, salpicos e mordedura. Para valores baixos poderá surgir porosidades e sobreposição de metal na margem do cordão.

O comprimento de arco é uma variável independente, mas a tensão no arco depende tanto do comprimento do arco, como de outras variáveis tais como composição e diâmetro do eletrodo, gás de proteção e técnica de soldagem. A voltagem do arco significa aproximadamente a posição física do arco em termos elétricos; entretanto, a tensão no arco inclui a queda de tensão (Figura 7), devido ao comprimento do eletrodo, além do bico de contato.

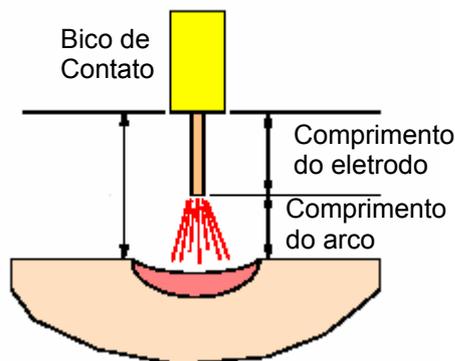


Figura 7 – Comprimento do arco (MODENESI, 2000)

Uma tensão de soldagem muito alta poderá causar porosidades, respingos e mordeduras. Já uma tensão muito baixa tenderia a estreitar o cordão de solda e aumentar a altura do reforço do cordão (GIMENES; RAMALHO, 2006).

2.5.2 Corrente de Soldagem

- Quando alta, irá influenciar diretamente na geometria do cordão, no volume da poça fundida, no incremento da taxa de fusão, na largura da ZTA (Zona termicamente afetada) e na microestrutura de depósito (efeito sobre o aporte térmico).
- Pode alterar o modo de transferência metálica.
- Uma elevação na corrente de soldagem irá ocasionar um aumento na rigidez do arco e reduzir o nível de salpicos minúsculos (mudança no modo de transferência).

Quando todas as outras variáveis do processo são mantidas constantes, a

corrente de soldagem varia com a velocidade de alimentação do arame ou com a taxa de fusão de maneira não linear. À medida que a velocidade de alimentação do eletrodo é variada, a corrente de soldagem vai variar de maneira semelhante se uma fonte de tensão constante for utilizada. Esta relação da corrente de soldagem com a velocidade de alimentação para eletrodos de aços carbono é mostrada na Figura 8.

Se forem mantidas constantes todas as demais variáveis de soldagem, um aumento na corrente de soldagem (aumento na velocidade de alimentação do arame), irá causar aumento na profundidade e largura de penetração, aumento na taxa de deposição e aumento do cordão da solda (GIMENES; RAMALHO, 2006).

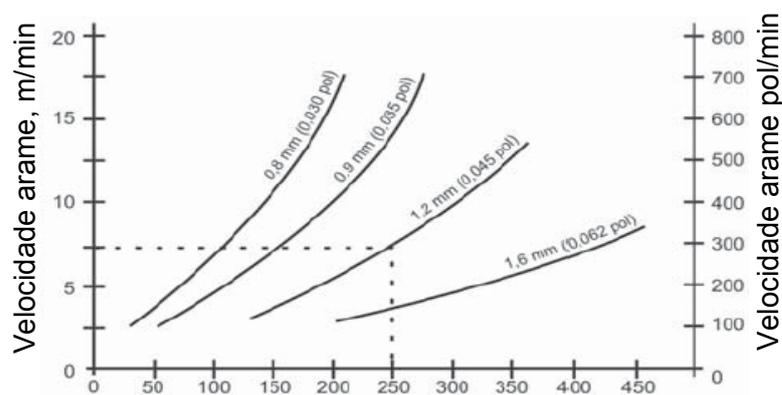


Figura 8 - Corrente de soldagens típicas X alimentação de eletrodos de aço (BRACARENSE, 2004)

2.5.3 Velocidade de Soldagem

- Um aumento na velocidade de soldagem irá propiciar estreitamento do cordão e uma elevação na penetração, num primeiro instante, e diminuição desta em valores maiores.
- Em velocidades muito altas poderá ocorrer o surgimento de mordeduras (geometria irregular de cordão) e de trincas de solidificação.
- O incremento na velocidade de soldagem, mantidos os outros parâmetros fixos, acarretará ainda uma redução no nível de distorção, tamanho da ZTA e modificação na microestrutura do metal depositado.

- Velocidades altas de soldagem, pelo efeito na taxa de resfriamento, também acarretarão aumentos nos limites de ruptura e escoamento e uma redução da alongação (BRACARENSE, 2003).

2.5.4 Ângulo de inclinação da tocha de soldagem

- A utilização de um ângulo de deslocamento (ou ataque) negativo, compreendido entre 0 a 20° , já que seu valor depende da posição de soldagem empregada, facilitará o processo de limpeza catódica (remoção de óxido, crítico em metais como o alumínio e titânio, por exemplo). A aplicação de ângulo negativo, apesar do fácil controle e facilidade na operação, também provocará baixa penetração, acompanhamento de um cordão largo e chato e com reduzida incidência de salpico (Figura 9) (BARRA, 2003).

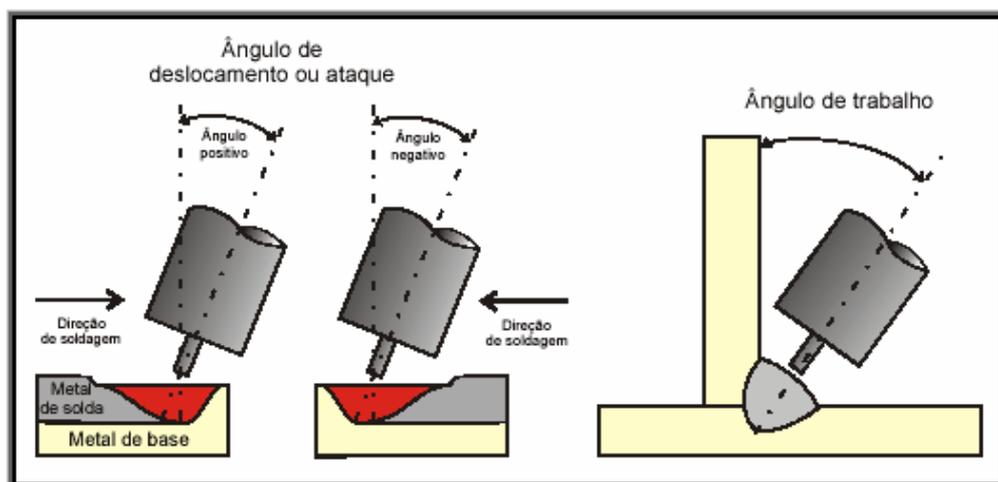


Figura 9 - Ângulos de posicionamento da tocha (BARRA, 2003)

- O emprego do ângulo de deslocamento positivo (eletrodo à ré), compreendido entre 0 a 20° produz cordões com maior penetração e reforço convexo, embora o controle da operação de soldagem se torna mais difícil e o efeito da proteção do gás tende a diminuir, podendo gerar porosidade.

- Transversalmente à solda localiza-se o ângulo de trabalho, compreendido normalmente entre 35 a 115° em relação a vertical, que apresenta de trabalho dependerá do tipo de junta e da posição de soldagem (BARRA, 2003).

2.5.5 Distância entre bico de contato e o metal de base (DCP)

- A posição do bico de contato, Figura 10, dependerá do modo de transferência com o qual se deseja soldar. De uma maneira simples para a soldagem no modo goticular o bico de contato deverá permanecer recuado em relação ao bocal e, para a soldagem em curto-circuito, o bico de contato deverá permanecer faceando ou projetado do bocal (BARRA, 2003).
- Valores excessivos de DCP poderão prejudicar a blindagem gasosa, facilitar a oscilação do arame projetado, aumentar a incidência de salpicos e porosidades e tornar o cordão irregular.

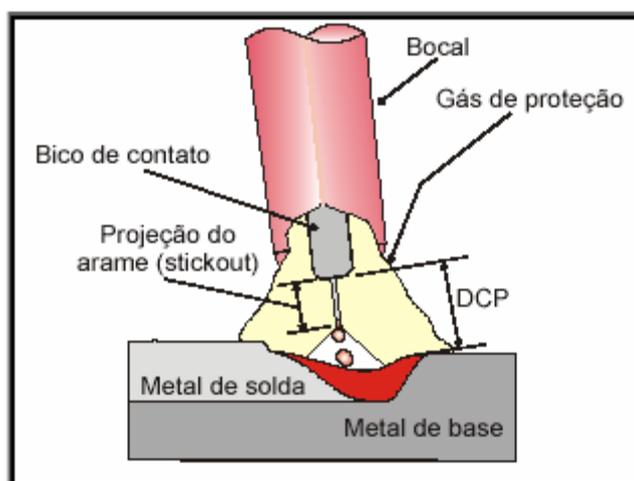


Figura 10 - Representação da distância contato peça e da projeção do arame (BARRA, 2003)

- Valores baixos de DCP poderão ocasionar penetração profunda, reforços altos e cordões estreitos (pela redução no valor da tensão) e aderência de salpicos no local.

2.6 Equipamentos

O GMAW pode ser utilizado de forma automática ou semi-automática. O equipamento básico para qualquer utilização consiste de:

- Tocha de soldagem (resfriada por ar ou água)
- Unidade de alimentação de eletrodo
- Controle de soldagem
- Fonte de energia
- Fonte regulável de gás protetor
- Fonte de eletrodo
- Cabos e mangueiras de conexão
- Sistema para recirculação de água. A Figura 11 ilustra o equipamento necessário para tal operação.

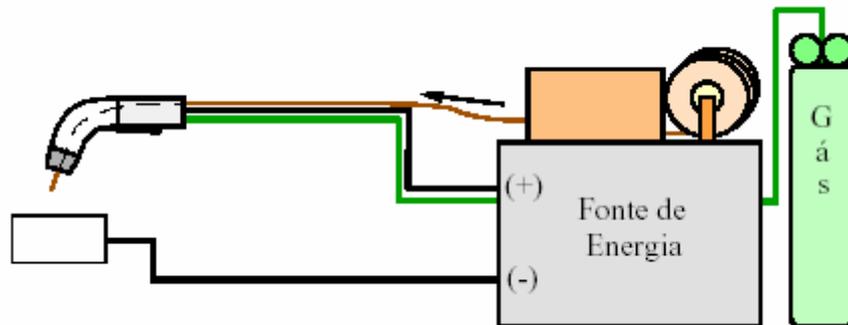


Figura 11 - Instalação para soldagem GMAW mecanizado (MODENESI, 2000)

2.6.1 Alimentador de Arame

O alimentador de arame (Figura 12) normalmente utilizado é acionado por um motor de corrente contínua. Alimentadores de arame normalmente são utilizados em combinação com uma fonte de tensão constante. Eles podem ser utilizados com uma fonte de corrente constante se adaptações forem feitas.



Figura 12 - Alimentador de Arame para solda robotizada (MERKLE, 2006)

Quando uma fonte de corrente constante é utilizada, um sensor de tensão automático é necessário. Este controle detecta mudanças na tensão do arco e ajusta a velocidade da alimentação de arame de modo a manter constante a tensão do arco. Esta combinação de velocidade variável de alimentação e fonte de tensão constante permite diâmetros de arames mais grossos, onde as velocidades de alimentação são menores. Em altas velocidades de alimentação, a dificuldade de se manter o arco estável é maior.

O motor de alimentação é conectado a um sistema de roletes que transmitem força ao eletrodo, puxando-o da fonte de arame e empurrando em direção a tocha de soldagem. Pode-se utilizar varias combinações de roletes para garantir que o arame não enrugue ou dobre após o seu deslocamento.

2.6.2 Controle de Soldagem

A função principal do controle de soldagem é regular a velocidade de alimentação do arame. Com o aumento da velocidade do arame, o operador aumenta a corrente de soldagem. A redução da velocidade de alimentação resulta em uma redução nos valores de corrente. O processo também regula o início e o fim da alimentação do eletrodo, através do gatilho na tocha.

Existem também disponíveis controles de alimentação que permitem o uso de "touch start", onde a alimentação começa quando o eletrodo toca a peça, ou "slow run in", onde a alimentação é reduzida até que o arco seja iniciado, e então aumentada para os valores necessários à soldagem. Estes dois melhoramentos são empregados inicialmente em conjunto com fontes de corrente constante, e são particularmente úteis para soldagem de alumínio.

Normalmente, o gás de proteção, a água de resfriamento e a energia de soldagem são também levadas a tocha através do controle, requerendo conexão direta do controle com estes recursos. O fluxo de água e gás é regulado de modo a coincidir com o começo da soldagem. O controle pode seqüenciar o começo e interrupção do fluxo de gás, energizar o contactor, permitir que o fluxo de gás seja iniciado antes do começo da soldagem e que se interrompa após o término da soldagem do modo a proteger a poça fundida (BRACARENSE, 2003)

2.6.3 Fontes de Energia

A soldagem a arco exige uma fonte de energia (máquina de soldagem) especialmente projetada para esta aplicação e capaz de fornecer tensões e corrente, em geral, na faixa de 10 a 40 V e 10 a 1200 A, respectivamente. (MODENESI, 2005).

As fontes de soldagem fornecem energia elétrica para o eletrodo e para a peça de trabalho de forma a produzir o arco elétrico. Para a maioria das aplicações usando a soldagem GMAW, utilizam-se fontes de corrente constante com eletrodo positivo (DCEP), então, o pólo positivo é conectado a tocha e o negativo a peça de trabalho. A constituição interna destas fontes é, geralmente, do tipo transformador-retificador, ou geradores (pouco usuais). Os transformadores-retificadores são

preferíveis em oficinas, pois trabalham com fonte de 230 V ou 460 V. Este tipo responde mais rápido que os geradores quando as condições do arco mudam. Os geradores são utilizados normalmente quando não existe fonte de energia disponível.

Ambos os tipos de fonte de energia são designados para fornecer corrente constante ou tensão constante.

As fontes de corrente constante mantêm um nível relativamente fixo de corrente durante a soldagem indiferentemente da variação no comprimento do arco. Estas máquinas são caracterizadas por alta tensão em aberto e são limitadas a níveis de corrente por curto circuito.

Como elas fornecem uma saída em corrente constante, o arco vai ser mantido com comprimento fixo somente se a distância do tubo de contato a peça permanecer fixa com uma alimentação constante de arame.

Na prática, como a distância vai variar, o arco vai tender então a queimar em direção ao contato ou mergulhar na poça. Isto é evitado então com o uso de uma alimentação controlada pela tensão. Quando a tensão (comprimento do arco) aumenta ou diminui, o motor de alimentação acelera ou reduz a velocidade de modo a fazer com que o comprimento do arco permaneça constante. Este tipo de fonte é geralmente utilizada com transferência spray, pois a duração limitada do arco com a transferência em curto-circuito torna o controle da voltagem impraticável neste caso.

As fontes do tipo tensão constante são utilizadas em conjunto com uma alimentação constante de arame e mantêm uma tensão aproximadamente constante durante a soldagem. Estas fontes compensam variações da distância entre o contato e peça de trabalho, que ocorrem normalmente durante a soldagem, pelo aumento ou redução instantânea da corrente de soldagem (FORTES, 2004)

O mecanismo de auto correção é ilustrado pela Figura 13. Se a distância entre a ponta do eletrodo à peça aumentar, a tensão e o comprimento do arco também tendem a aumentar. Entretanto, a corrente diminui com o menor aumento na tensão, deste modo o stick-out tende a voltar ao valor original com a redução no consumo do eletrodo. Reciprocamente, se a distância é diminuída, a baixa tensão vai ser acompanhada em um aumento na corrente que compensa a diminuição do stick-out através do aumento na taxa de fusão. As características de auto correção das fontes de tensão constantes são importantes para produção de condições estáveis de soldagem, mas existem algumas variáveis que contribuem para performance ótima de soldagem, particularmente para transferência em curto-circuito.

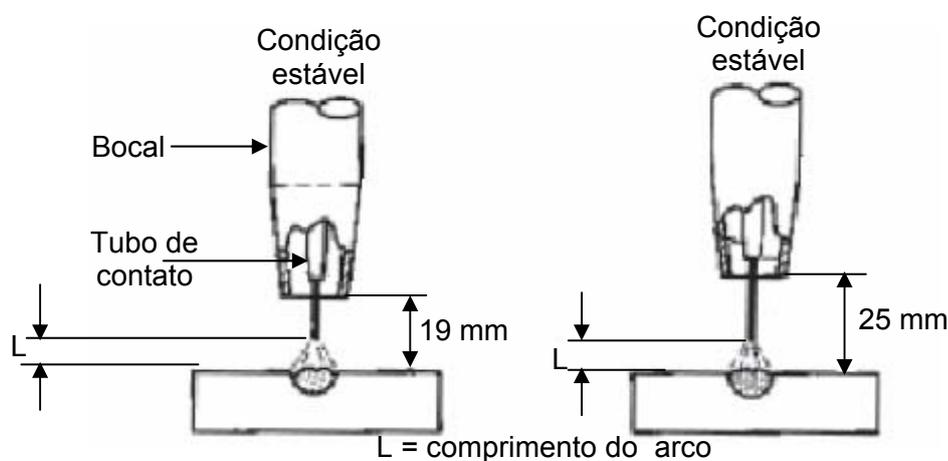


Figura 13 - Regulagem automática do tamanho do arco em GMAW (BRACARENSE, 2003)

Uma importante variável das fontes de soldagem é a indutância. Quando o eletrodo toca a peça a corrente aumenta rapidamente até um alto nível. A característica do circuito que afeta a taxa em que a corrente sobe é a indutância. O Efeito Pinch (ver Figura 14) é determinado pelo nível final de corrente de curto circuito. Como a indutância controla a taxa de crescimento da corrente, sem indutância o efeito pinch vai ser aplicado rapidamente fazendo com que a gota caia

violentamente do eletrodo causando respingos excessivas. Alta indutância resulta na diminuição dos curtos circuitos por segundo e no aumento dos tempos de arco ligado. Na transferência Spray a variação da indutância não vai influenciar as condições de soldagem (FORTES, 2004)

A inclinação da curva estática é outra característica importante da fonte de soldagem. A inclinação é definida pelo fabricante ou pode ser determinada pelo usuário através de métodos simples.

A maior função desta variável na transferência curto circuito é que ela controla a magnitude da corrente de curto circuito, que é a amperagem que resulta quando o eletrodo toca a peça. Como a separação das gotas se dá pelo efeito pinch, a qualidade de corrente no curto circuito durante a transferência determina o modo com que as gotas se destacam.

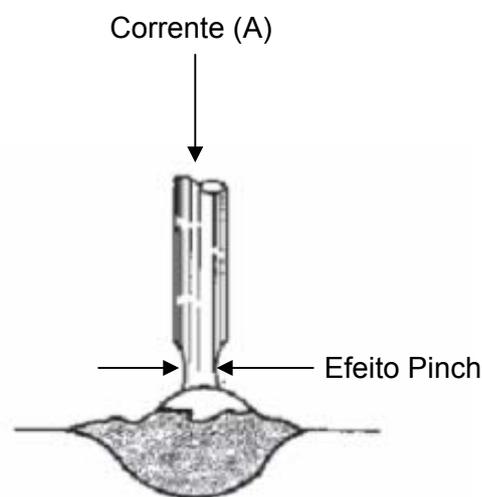


Figura 14 - Efeito Pinch (BRACARENSE, 2003)

Quando esta inclinação é pequena na fonte de energia, a corrente de curto circuito vai crescer rapidamente até um nível alto. O efeito pinch vai ser alto e as

gotas fundidas vão separar violentamente do arame criando respingos excessivos, assim como por efeito da baixa indutância.

Se a corrente de curto circuito disponível é limitada devido a uma curva íngreme, o efeito pinch vai ser baixo para separar a gota e estabelecer o arco. Por este motivo, muitas máquinas são equipadas com ajustes de inclinação (FORTES, 2006).

2.6.4 Regulador do Gás de Proteção

Um sistema é necessário para fornecer fluxo constante de gás de proteção. A fonte de gás consiste normalmente de um cilindro de gás ou mistura de gases a serem usadas na proteção do cordão de solda, ajustadas por reguladores de pressão e/ou vazão. Em oficinas com um número grande de equipamentos, instalações centralizadas para armazenamento e distribuição de gases podem ser úteis (BRACARENSE, 2003).

2.6.5 Fontes de Arame

O processo GMAW utiliza uma alimentação contínua de arame como eletrodo, consumido a altas velocidades. Por isso, a fonte de arame deve, deste modo, suprir um grande volume de fio para que a alta eficiência do processo seja garantida. A Figura 15 mostra alguns tipos de fontes de arames. Normalmente, os arames são fornecidos em bobinas ou rolos de pesos entre 0,45 a 27 Kg de fio. Algumas indústrias podem utilizar tambores ou carretéis de pesos entre 340 a 450 Kg, ou bobinas menores (colocadas nas tochas) de baixo peso (0,45 a 0,9 Kg). Aplicações especiais ou de utilização militar podem requerer embalagens especiais.

Normalmente, necessidades especiais podem ser acordadas entre o fornecedor e o usuário.



Figura 15 - Tipos de fontes de arame (COMERCIAL GERDAU, 2006)

2.6.6 Consumíveis

Os principais tipos de consumíveis utilizados na soldagem GMAW são o arame e o gás de proteção. A composição química do eletrodo, do metal de base e do gás de proteção é que determinarão a composição química do cordão de solda. A composição química do metal de solda determina grandemente as propriedades mecânicas e químicas da solda feita. Os fatores que influenciam a escolha do tipo de eletrodo e do gás de proteção são:

- Metal Base
- Propriedades mecânicas requeridas pelo cordão de solda
- Condição e pureza do metal base
- Tipo de serviço e aplicações específicas requeridas
- Posição de soldagem
- Modo pretendido de transferência do metal.

2.6.7 Eletrodos

Geralmente, para união, as composições dos eletrodos são similares às encontradas no metal de base. A composição do metal de enchimento pode ser alterada suavemente de modo a compensar perdas que possam ocorrer devido ao arco de soldagem ou para levar à desoxidação do metal de solda. Em alguns casos isto envolve algumas modificações na composição do metal de base. Em certas aplicações, entretanto, a obtenção de características de soldagem satisfatórias e de certas propriedades do metal de solda requer um eletrodo com composição química diferente do metal base. Devido a isto, ligas para o eletrodo são designadas para produzir as propriedades do metal desejadas com as características operacionais aceitáveis.

Mesmo que outras modificações na composição do eletrodo sejam feitas, desoxidantes e limpantes são geralmente adicionados. Isto é feito para reduzir a incidência de porosidade e assegurar a qualidade mecânica da solda. Os desoxidantes mais utilizados são, sílica, manganês e alumínio. Titânio e sílica são os principais desoxidantes usados nos arames de liga de níquel. Arames de ligas de cobre podem utilizar titânio, sílica e fósforo como elementos desoxidantes

Os diâmetros mais comuns dos arames variam entre 0,9 a 1,6 mm. Arames mais finos (0,5 mm) ou mais grossos (3,2 mm) podem ser utilizados. Entretanto, as altas velocidades de alimentação requeridas por arames finos podem inviabilizar o processo.

Quaisquer compostos utilizados na superfície do eletrodo ou do metal de base, tais como lubrificantes, podem afetar a qualidade da solda e, portanto, não devem ser utilizados. Conseqüentemente, os eletrodos devem ser manufacturados com alta qualidade superficial de modo a permitir sua passagem pelo contato elétrico

e prevenir o acúmulo de contaminantes (BARRA, 2003)

Os arames para soldagem GMAW são cobertos por várias especificações da AWS. Outras normas também definem especificações especiais. As normas definem requerimentos para tamanho, embalagem, composição química e algumas vezes propriedades mecânicas. As especificações dos eletrodos para soldagem GMAW são listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificação para eletrodos para soldagem GMAW (GIMENES; RAMALHO, 2006)

Tipo de Metal Base	Especificação
Aço carbono	A 5.18
Aços de baixa liga	A 5.28
Ligas de alumínio	A 5.10
Ligas de cobre	A 5.7
Magnésio	A 5.19
Ligas de níquel	A 5.14
Aço inoxidável	A 5.9
Titânio	A 5.16

2.7 Gases de Proteção

2.7.1 Função

Essencialmente, os gases utilizados na soldagem MIG/MAG têm como função a proteção do material fundido contra elementos da atmosfera que possam comprometer a integridade da solda efetuada. Eles formam uma barreira física contra o acesso de, principalmente, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, reduzindo a susceptibilidade à formação de poros, excesso de óxidos, nitretos, inclusões e trincas a frio, todos prejudiciais à resistência da junta soldada (IRVING, 1994; CHAE, 1999). Para que isso seja conseguido, o fluxo de gás de proteção na ponta da tocha deve ser adequado, evitando o escoamento turbulento, e não deve haver orifícios que permitam entrada de ar no fluxo. Ambos permitiriam a chegada de ar

atmosférico na poça. Na realidade, a importância dos gases utilizados na soldagem MIG/MAG se estende à própria viabilidade de realização do processo, pois deles depende a própria subsistência do arco elétrico de maneira coerente. Ao serem aquecidos e submetidos à tensão entre os eletrodos, os gases se dissociam liberando íons, necessários à formação do plasma e condução da corrente. São enfatizados, neste texto, misturas de Argônio (Ar) e Dióxido de Carbono (CO₂) e o CO₂ puro, que são os gases mais aplicados em problemas como o aqui atacado. Outra função importante assumida pelos gases na soldagem MIG/MAG de aços diz respeito à estabilidade do arco. Gases oxidantes são adicionados para que se forme uma película oxida sobre a poça fundida, propiciando a chamada estabilização dos pontos catódicos (BAIXO, 1999; VAIDYA, 2002; IRVING, 1994). Caso contrário, o arco é alimentado de elétrons advindos das bordas da poça aleatoriamente, o que está relacionado à queda de estabilidade do arco. Este fato é identificado pelo aparecimento de ataque eletroquímico nesta região (BAIXO, 1999).

2.7.2 Efeitos

Muitas vezes citados como funções dos gases, os efeitos que os mesmos causam no processo não são assim considerados, pois as características do processo e do resultado vão depender não apenas da composição dos gases, mas de toda a configuração do procedimento, incluindo vários outros parâmetros de soldagem.

Para exemplificar o exposto, cita-se o efeito do gás CO₂ de restringir o arco e, conseqüentemente, causar uma redução de área da interface arco-gota, em comparação com outra mistura mais pobre em CO₂, em regulagens de processo semelhantes. Este comportamento se deve a maior condutividade térmica do CO₂, e

tende a originar uma força na gota em sentido contrário ao seu destacamento, o que, por sua vez, tende a levar o processo ao modo de transferência por curto-circuito (STENBAKCA, 1989; BAIXO, 1999; VAIDYA, 2002). No entanto, não se pode afirmar que é função do CO₂ definir o modo de transferência de determinada solda, pois isso dependerá, principalmente, da variável corrente. Esta força é a razão pela qual também há maior tendência a respingos, conforme o aumento de CO₂ no gás (Figura 16) (MOYER, 2002; IRVING, 1999; DILLENBECK, 1987).

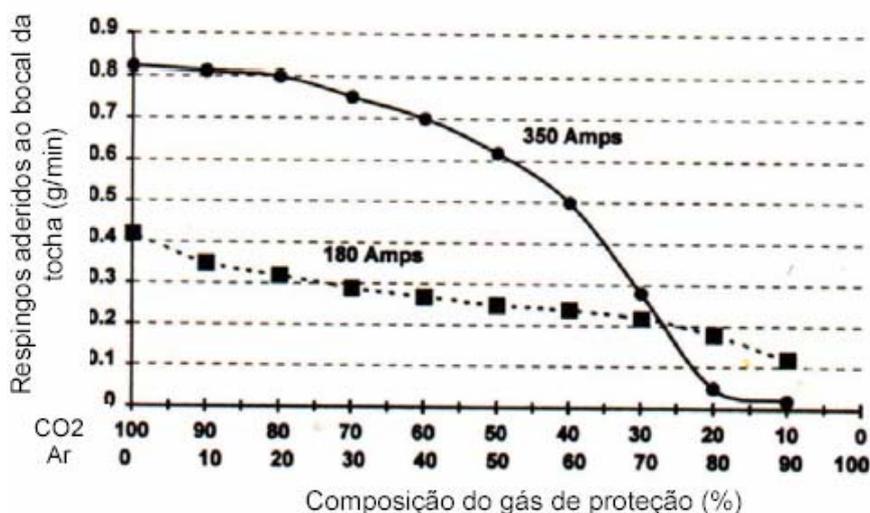


Figura 16 - Redução do nível de respingos com a redução do teor de CO₂ no gás de proteção (IRVING, 1999)

Em se tratando de respingos, existe também o efeito explosivo causado por gases ricos em CO₂, advindo da formação de gases de oxidação e sua expansão repentina. Este fato contribui para a afirmação de que gases ricos em CO₂ produzem, em geral, pior acabamento da solda e necessidade de limpeza adicional da mesma e, devido à adesão de respingos ao bocal, maior tempo de limpeza deste e maior possibilidade de contaminação da poça, por perturbação no fluxo de gás (STENBAKCA, 1989; BAIXO, 1999; CULLISON, 1999; LIU; SIEWERT, 1989; CHAE, 1999).

Em adição ao fornecimento de atmosfera de proteção, o gás e o fluxo de gás

produzem efeitos importantes nas seguintes variáveis:

- Características do arco
- Modo de transferência
- Penetração e forma do cordão de solda
- Velocidade de soldagem
- Tendência ao trincamento
- Ação de limpeza.
- Propriedades mecânicas do metal de solda.

Os principais gases utilizados estão relacionados na Tabela 2, sendo a maioria mistura de gases inertes que podem conter CO₂.

Tabela 2 - Principais gases utilizados na soldagem (BRACARENSE, 2003)

Gás ou Mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Quase todos os metais, exceto o aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas. Alta penetração
Ar + He (20-50%)	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
Nitrogênio	-	Cobre (maior energia de soldagem)
Ar + N ₂ (20-30%)	-	Idem N ₂ , mas melhor que 100% de N ₂
Ar + O ₂ (1-2%)	Liga oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + O ₂ (3-5%)	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns de baixa liga
Ar + CO ₂ (20-50%)	Oxidante	Vários aços. Transferência por curto-circuito
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Vários aços

2.7.3 Gases de Proteção Inertes

O argônio e hélio são gases inertes. Estes gases puros ou misturas destes gases são utilizados na soldagem de materiais não ferrosos, inoxidáveis, aços carbono e aços baixa ligas. As principais diferenças entre o argônio e o hélio são a densidade, a condutividade térmica e o potencial de ionização.

O argônio é aproximadamente 1,4 vezes mais denso que o ar, enquanto a densidade do hélio é aproximadamente 0,14 vezes a do ar. O argônio, mais pesado, é mais efetivo na proteção do arco e cobrimento da área de soldagem na posição plana. O Hélio requer aproximadamente 2 ou 3 vezes maiores vazões que o argônio para fornecer proteção igual.

O hélio tem maior condutividade térmica que o argônio e produz um plasma que a energia é mais uniformemente distribuída. O plasma do argônio, por outro lado, é caracterizado como tendo uma alta energia no centro e uma baixa energia nas regiões de fora. Essa diferença afeta a forma do cordão de solda. Um arco de solda protegido por hélio produz um cordão de solda profundo, parabólico e largo. Um arco protegido por argônio produz um cordão de solda caracterizado por penetração tipo dedo.

O hélio tem um potencial de ionização maior que o argônio, e conseqüentemente, uma tensão mais alta quando outras variáveis são mantidas constantes. O hélio pode apresentar problemas na iniciação do arco. Arco protegido somente com hélio não forma transferência spray em nenhum modo de corrente. Os arcos protegidos com hélio produzem maiores quantidades de respingos e tem acabamento mais áspero do que arcos protegidos com o argônio.

Na transferência por curto circuito, misturas de argônio com 60 a 90% de hélio são utilizadas para obter altos aportes de calor no metal base para melhores

características de fusão. Misturas de argônio com 50 a 75% de hélio aumentam a tensão do arco em relação ao argônio puro. Estes gases são utilizados para soldagem de alumínio, magnésio, e cobre devido ao seu alto aporte de calor que acaba por reduzir o efeito de altas condutividades térmicas. Proteção de argônio puro pode ser utilizada em muitas aplicações para soldagem de materiais não ferrosos. O uso de hélio puro geralmente é restrito a áreas mais especializadas, devido a sua limitada instabilidade. Entretanto, as características desejáveis encontradas com o hélio (profundidade, largura e formato) podem ser aproveitadas utilizando-se uma mistura de gases de proteção. O resultado é mostrado na Figura 17 que representa um aperfeiçoamento na forma da poça (BRACARENSE, 2003).

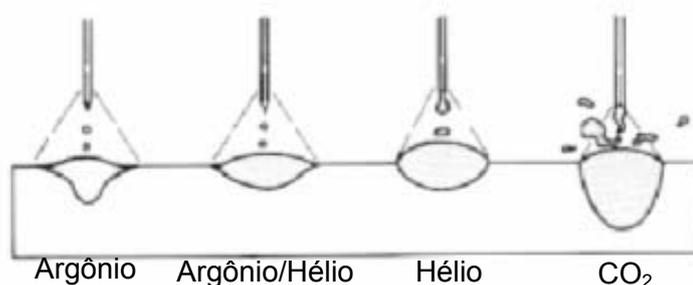


Figura 17 - Contorno e penetração da solda para diversos gases de proteção (BRACARENSE, 2003)

2.7.4 Adições de Oxigênio e CO₂ ao Argônio e Hélio

A proteção do arco por argônio puro causa um arco irregular e uma tendência à trinca de raiz. Adições de pequenas porcentagens de oxigênio ou CO₂ produzem notável melhora na estabilidade do arco e produzem soldas livres de trincas de raiz.

Segundo Linnert (1965) a utilização de Argônio puro e CO₂ produzem na solda uma boa penetração. Contudo, a área penetrada, S_p , quando se utiliza CO₂ como gás de proteção, é maior comparada com a área conseguida utilizando

Argônio puro. Com a mistura desses dois gases, tem um aspecto misto entre os dois perfis dos gases puros, como pode ser visto na Figura 18.

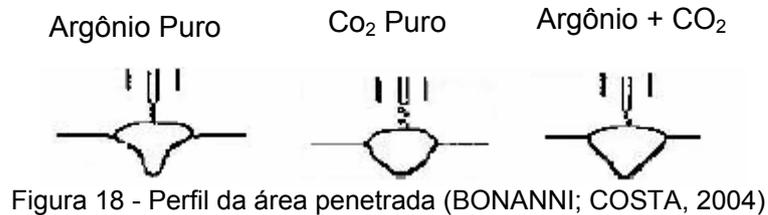


Figura 18 - Perfil da área penetrada (BONANNI; COSTA, 2004)

A quantidade ótima de oxigênio ou CO₂ a ser acionada depende da condição da superfície, geometria da junta, posição ou técnica de soldagem e da composição do metal base. Adições de dióxido de carbono ao argônio podem melhorar a aparência do cordão de solda (Figura 19). Adicionando-se oxigênio ao gás melhora-se a fluidez da poça de fusão, penetração e estabilidade do arco. Oxigênio também diminui a corrente de transição. A tendência à trinca de raiz é reduzida, apesar de considerável oxidação da solda ocorrer, com notável perda de sílica e manganês.

As misturas de Argônio com dióxido de carbono são utilizadas em aços carbono e baixa liga e em menor extensão em aços inoxidáveis. Adições de dióxido de carbono aumentam a corrente de transição, aumentam perda de respingos, aumentam a penetração e diminuem a estabilidade do arco. Misturas de Argônio/CO₂ são primariamente utilizadas em aplicações com transferência de curto circuito, mas também são utilizadas com spray e arco pulsado.

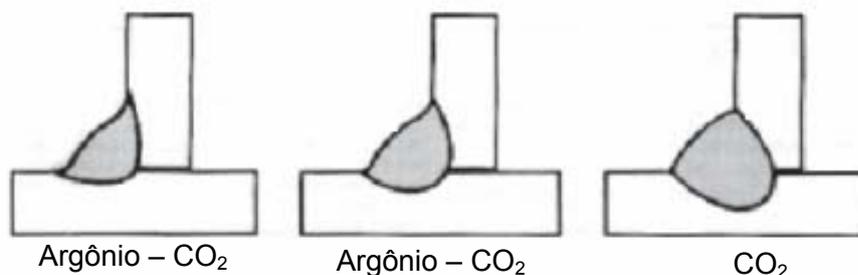


Figura 19 - Efeito da adição de oxigênio versus dióxido de carbono à proteção de argônio

(BRACARENSE, 2003)

2.7.5 Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono é um gás reativo grandemente utilizado na sua forma pura para soldagem em aços carbono e baixa liga. É o único gás reativo utilizado sozinho para proteção de soldas GMAW. Altas velocidades de soldagem, grandes penetrações e baixo custo são características gerais que tem encorajado o uso do CO₂.

A transferência pode ser por curto circuito ou globular. Com transferência globular, o arco é rude com alto nível de respingo, o que exige utilização de práticas de soldagem para minimizar este fator.

Em comparação com proteções ricas em argônio, a proteção com CO₂ produz um cordão com excelente penetração, com superfície áspera e menor "lavagem" nos contornos do cordão devido ao arco restrito.

A utilização de CO₂ puro como gás de proteção apresenta, inicialmente, uma vantagem muito grande em comparação a utilização de gases inertes que é o custo do gás (GIMENES; RAMALHO, 2006).

2.7.6 Seleção de Variáveis

A seleção do melhor gás de proteção é baseada nas considerações sobre o material a ser soldado e o tipo de transferência a ser utilizada.

A seleção dos parâmetros do processo (amperagem, voltagem, velocidade de deslocamento, fluxo de gás, extensão do eletrodo, etc.) requer algumas tentativas para determinar um conjunto de condições aceitáveis. Isto se torna mais difícil devido à interdependência de muita das variáveis.

Quando selecionando um equipamento, o comprador deve considerar os requisitos da aplicação, faixa de saída de potência, características estáticas e

dinâmicas e velocidades de alimentação do arame. Quando um novo equipamento está para ser comprado, algumas considerações devem ser feitas quanto à versatilidade do equipamento e a padronização. Por exemplo, se uma quantidade variada de trabalhos vai ser feita, a versatilidade é importante na escolha do equipamento (GIMENES; RAMALHO, 2006).

2.8 Inspeção e Qualidade da Solda

Os procedimentos de qualidade para juntas feitas em GMAW são similares a aquelas utilizadas nos outros processos. Dependendo das especificações, procedimentos de inspeção devem ser fornecidos para determinar a adequação de soldadores e soldagem, qualificação de procedimentos satisfatórios de soldagem e realização de completo exame dos produtos finais.

A Inspeção da solda resume-se a ensaios não destrutivos tais como: visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, radiografia ou ultra-som (ABENDE, 2004). Ensaios destrutivos (tensão, fadiga, cisalhamento, impacto, dobramento, fratura, corte transversal ou dureza) são empregados no desenvolvimento da engenharia e no procedimento de soldagem, nos testes de qualificação da solda e do soldador.

2.8.1 Fragilização por Hidrogênio

Na fragilização por hidrogênio, a possibilidade deste problema acontecer com GMAW é pequeno, uma vez que nenhum fluxo higroscópico ou revestimento é utilizado. Entretanto, outras fontes de hidrogênio devem ser consideradas. Por exemplo, o gás de proteção deve conter umidade suficientemente baixa. Ela deve ser bem controlada pelo fornecedor de gás. Óleo, graxa e componentes são lu-

brificantes do eletrodo ou do metal base torna-se fontes potenciais de hidrogênio no metal de solda.

A fragilização pelo hidrogênio é caracterizada pelos fatos (POUND, 1998 e BEGHINI, et al 1998):

- degradação das propriedades mecânicas dos aços;
- diminuição da ductilidade em tração, que é diretamente proporcional ao teor de hidrogênio contido no metal;
- tendência a mudar a morfologia da fratura de dútil para frágil;
- redução da tenacidade à fratura;
- é mais crítica em situações de baixa taxa de deformação;
- ocorre entre 173K e 373K, sendo maior em temperaturas próximas à ambiente;
- necessita que o metal que contém hidrogênio esteja submetido a tensões trativas locais;
- aços de alta resistência mecânica são particularmente susceptíveis ao fenômeno.

Vários autores defendem a idéia de que existe uma concentração crítica de hidrogênio para a fragilização pelo hidrogênio (LUNARSKA, et al 1997 e PRESSOUYRE; FAURE, 1988). (DIETZEL; PFUTT, 1996) consideram que existe apenas uma concentração crítica para propagar uma trinca porque as pré-trincas (microtrincas) já existem.

2.8.2 Contaminação por Oxigênio e Nitrogênio

Oxigênio e nitrogênio são problemas que devem ser mais considerados que o hidrogênio nos processos GMAW. Se os gases de proteção não forem com-

pletamente inertes ou não protegerem adequadamente a poça de fusão, esses elementos podem ser absorvidos da atmosfera durante a execução da solda. Por outro lado, tanto óxidos quanto nitretos podem também reduzir os problemas de entalhe no cordão de solda. Metal de solda é depositado por GMAW não é tão forte quanto o metal depositado por GTAW. Deve ser ainda mencionado aqui, entretanto, que uma porcentagem de oxigênio de até 5% ou mais pode ser adicionada ao gás, sem efeitos adversos para a solda (BRACARENSE, 2003).

2.8.3 Limpeza

A limpeza do metal base na soldagem GMAW é mais crítica quando comparada aos processos SMAW e SAW. Os compostos presentes no fluxo e no revestimento possuem a capacidade de limpeza e desoxidação do metal fundido, não ocorrendo o mesmo no processo GMAW. Isto torna necessário cuidado especial antes da soldagem e entre-passes. Isto é particularmente verdadeiro para alumínio, onde procedimentos elaborados para limpeza química e remoção mecânica de óxidos metálicos são aplicados (BRACARENSE, 2003).

2.8.4 Fusão Incompleta

O aporte de calor reduzido comum à transferência por curto circuito resultam em baixa penetração através do metal base. Este procedimento é desejável em materiais finos ou em soldagem fora de posição. Entretanto, a utilização imprópria da técnica pode resultar em fusão incompleta, especialmente em áreas de raiz ou ao longo das faces, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Possíveis causas e ações para fusão incompleta (BRACARENSE, 2003)

Possíveis Causas Fusão Incompleta	Ações Corretivas
Superfície da zona de soldagem com óxidos	Limpeza de quaisquer impurezas de todas as faces e superfície onde a solda vai ser feita
Aporte térmico insuficiente	Aumento da velocidade de alimentação de arame e da tensão do arco.
Poça de soldagem muito grande	Redução da extensão do arco. Minimizar costura excessiva para produzir uma poça de tamanho controlável. Aumentar a velocidade de soldagem
Técnica imprópria de soldagem	Quando utilizando costura, permaneça momentaneamente nas paredes do entalhe. Providenciar melhor acesso à raiz da junta. Mantenha o eletrodo na extremidade principal da poça.
Projeto de junta impróprio	Utilizar ângulo do entalhe maior o suficiente de modo a permitir o acesso ao fundo da abertura.
Velocidade de soldagem excessiva	Reduzir a velocidade de soldagem

2.8.5 Descontinuidade da Solda

Algumas das descontinuidades mais comuns no processo GMAW são listadas nos parágrafos seguintes:

2.8.5.1 Mordedura

A mordedura (Figura 20) é caracterizada pela fusão do metal base na região adjacente à margem do cordão de solda. Ela não deve ser confundida com a deposição insuficiente, onde pode observar a face original do chanfro no metal base (TSH, 2005). A Tabela 4 mostra as possíveis causas e ações corretivas.

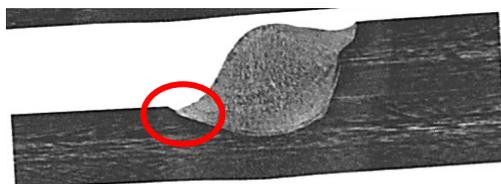


Figura 20 - Mordedura no pé da solda (CAMARGO, 2006)

Tabela 4 - Possíveis causas e ações para mordedura (BRACARENSE, 2003)

Possíveis Causas Mordedura	Ações Corretivas
Velocidade excessiva	Utilização de menores velocidades
Tensão alta	Redução da soldagem
Corrente de soldagem alta	Redução da velocidade de alimentação do arame
Pulsagem insuficiente	
Ângulo da tocha	Mudança no ângulo da tocha de modo que a força do arco possa ajudar na adição do metal

2.8.5.2 Porosidade

A porosidade (Figura 21) é caracterizada pelo aprisionamento de bolhas de gás no cordão de solda. Ela está associada a um aumento na quantidade de gás dissolvido na poça de fusão. Os poros podem ser do tipo agrupados, alinhados, etc.



Figura 21 - Porosidade do tipo agrupada (CARAN, 2004)

2.8.5.3- Falta de Penetração

A falta de penetração (Figura 22) é caracterizada pela produção de um cordão de solda que não une completamente a espessura das duas partes que estão sendo soldadas. Isto significa que, parte da espessura do material não foi completamente fundida e, como consequência, não teve penetração total. A tabela 5 mostra as possíveis causas e ações corretivas.

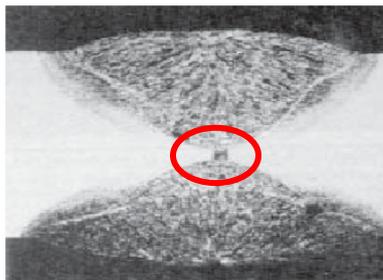


Figura 22 - Falta de penetração (CARAN, 2004)

Tabela 5 - Possíveis causas e ações para falta de penetração (BRACARENSE, 2003)

Possíveis Causas Penetração Incompleta	Ações Corretivas
Penetração imprópria na junta	Design da junta deve fornecer um acesso próprio ao fundo do entalhe enquanto mantendo extensão adequada do eletrodo. Reduzir raízes extensivamente largas. Aumentar a abertura da raiz em juntas de topo.
Técnica imprópria de soldagem	Manter o eletrodo normal à peça de trabalho de modo a alcançar penetração máxima
Corrente inadequada de soldagem	Aumentar a velocidade de alimentação.

2.8.5.4 Trincas

As trincas de solidificação são geradas pela presença de um filme líquido em um cordão de solda ou na zona de ligação, que está macroscopicamente solidificada. Este tipo de trinca está associado à composição química do metal base e a presença de tensões geradas durante a soldagem. Geralmente aparece durante o resfriamento no centro do cordão de solda ou na zona de ligação, ou mesmo em regiões reaquecidas na soldagem multipasso (MODENESI, 2001).

As causas de trinca de solidificação podem ser:

- Energia de soldagem erroneamente, isto é, corrente de soldagem elevada ou velocidade de soldagem baixa.
- Consumível especificado erroneamente: diâmetro excessivo para a geometria do chanfro

- Metal base com composição química incorreta, isto é, teores elevados de enxofre e fósforo.

2.9 Soldagem MAG Manual

Implica que todas as oito operações de soldagem devem ser realizadas manualmente.

Porém, nota-se que a fase 4, isto é, o movimento relativo entre a tocha e a peça de trabalho, pode incluir alguma ajuda mecânica como um manipulador que move a peça de trabalho de acordo com velocidade desejada para soldar. Um manipulador, chamado de motor de gravidade, no qual o soldador posiciona o peso para cima e enquanto ele desce, controla a velocidade da mesa, segurando a extremidade e deixando deslizar entre seus dedos na velocidade desejada, o que possibilita a produção de soldas mais lisas e contínuas circulares em posição *downhand*. A soldagem manual é muito popular com eletrodo revestido (SMAW), TIG (GTAW), oxiacetileno e plasma (UNB, 2006).

2.10 Soldagem MAG Robotizado

A necessidade em aumentar a produtividade, superam a escassez de trabalho qualificado e o aumento crescente das exigências de segurança elevou a demanda pela automação, superando assim, muitos dos problemas do dia a dia da soldagem. Dependendo da necessidade de uma organização, baseado nos processos de soldagem, material, tamanho e geometria do produto o grau de automatização escolhido pode ser maior ou menor.

A aceleração da mecanização na soldagem foi sentida realmente pela Indústria a partir de 1950, durante o processo de reconstrução depois da guerra,

com os programas de expansão de fábricas na Europa e nos EUA, resultando no desenvolvimento de novas técnicas de soldagem, e de um desenvolvimento na mecanização dos processos da soldagem, seguido pelo desenvolvimento de soldagem remota e de robôs.

A soldagem robótica é basicamente uma parte de um sistema automatizado de soldagem, mas é considerado separadamente, já que de todas as novas tecnologias acessíveis, os robôs são um dos tópicos mais interessantes, e por isso vamos fazer uma referência especial no seu uso na soldagem. Robôs articulados podem com facilidade simular os movimentos e ações de um ser humano na soldagem, e com certos limites, podem prover uma alternativa aceitável, para substituir homens em tarefas muito monótonas e fatigantes, o que é muito comum nas Indústrias de hoje. Um robô pode ser uma solução bem efetiva economicamente para trabalhos de soldagem a arco.

O mais simples robô é um manipulador que pode ser programado. Este manipulador é ativado pôr atuadores, motores elétricos, e controlado por um computador. A maioria dos robôs, utilizados em soldagem apresentam movimentos em 5 a 6 eixos, alguns destes eixos são prismáticos (deslizantes), e/ou rotacionais. A combinação de eixos define a utilização do robô. O controlador do robô possui uma memória onde programas podem ser armazenados, e para cada trabalho o robô pode-se utilizar um programa diferente, desta forma, é possível guardar programas e utilizá-los quando necessário.

Deste modo, os programas que são criados podem ser armazenados para uso futuro. Esta flexibilidade difere o robô da automatização fixa, que é dedicado a só uma tarefa. Sem dúvida, atualmente, os robôs não podem fazer todo o trabalho feito pelo homem. Onde é necessário soldar materiais desconhecidos ou onde o

acesso é muito limitado ou onde não podem ser fixados adequadamente os componentes a ser soldados, o uso de um robô é limitado. Há muitas limitações, onde um sistema de robô põe em prova seu custo. Assim, a soldagem robótizada não só é um assunto que relaciona a eletrônica de controle com todo o pacote de soldagem, mas executa uma fabricação com precisão, usando equipamento de manipulação da peça, e opera dentro de faixas muito exigentes de qualidade (UNB, 2006).

2.10.1 Variações de parâmetros em Soldagem MAG Robotizada

Na soldagem MAG Robotizado a qualidade da solda e suas propriedades mecânicas podem ser comprometidas por algumas variações de parâmetros, tais como:

- Ângulo da Tocha
- Inclinação de Soldagem
- Extensão do Arame
- Posição do Eletrodo
- Folga entre as chapas.

2.10.1.1 Tochas de Soldagem

Diferentes tipos de tochas de soldagem, são projetadas para obter a máxima eficiência no processo independentemente do tipo de aplicação, variando de soldas pesadas para altas correntes, soldas para alta produção e soldas leves para baixa corrente e soldagem fora de posição.

Os componentes básicos da tocha são os seguintes:

- Bico de contato

- Bocal de proteção de gás
- Conduíte do eletrodo
- Mangueira de gás
- Mangueira de água

O bico de contato é um tubo a base de cobre ou liga de cobre que transfere a corrente e guia o eletrodo em direção a área de trabalho. O tubo de contato é conectado eletricamente à fonte de energia pelo cabo de força. A superfície interna do tubo de contato deve ser suave, permitindo a passagem do arame sem restrições. As tabelas do fabricante especificam a lista dos tamanhos corretos de contato para cada tamanho de eletrodo e material.

O diâmetro interno é ligeiramente superior ao diâmetro do arame (0,13 a 0,25 mm), embora diâmetros menores sejam necessários para soldagem com o alumínio. A sua fixação deve ser firme na tocha e centralizada no bocal de saída de gás. A posição do contato em relação ao fim do tubo de gás deve variar dependendo do tipo de transferência. Deve-se inspecionar constantemente o tubo de contato, verificando se o seu orifício não está fora das tolerâncias indicadas pelo manual do fabricante. O uso excessivo ou a obstrução podem resultar em perdas de energia, modificando as características do arco elétrico.

O bocal direciona uma coluna de gás de proteção em direção à poça de soldagem. Um fluxo constante é extremamente importante para assegurar proteção apropriada contra a atmosfera para poça de fusão. Diferentes dimensões de bocal são disponíveis e devem ser escolhidas de acordo com o tipo de operação a ser executada: altas correntes de soldagem requerem bocais mais largos, enquanto baixas correntes e transferência por curto-circuito requerem bocais mais estreitos.

O conduíte suporta, protege e direciona o eletrodo dos roletes até a tocha de

soldagem e tubo de contato. Alimentação ininterrupta é necessária para assegurar uma boa estabilidade do arco.

Cuidados especiais devem ser tomados com o arame. O arame não deve dobrar ou torcer quando introduzido na tocha. No contato do arame com os roletes de contato do carro de alimentação, existe uma tendência de esmagamento do arame, o que se deve evitar. Os tubos de contato devem ser os recomendados pelo fabricante, evitando o enrugamento do arame (cada arame possui uma tolerância quanto ao diâmetro do orifício do tubo de contato).

O gatilho de acionamento do processo aciona um contactor que está ligado ao primário do transformador da fonte de soldagem, energizando o circuito de soldagem, além de acionar o alimentador de arame, e a uma válvula solenóide que comanda o fluxo de gás protetor para a tocha. As tochas para soldagem GMAW podem ser refrigeradas a água ou pelo próprio gás de proteção, dependendo de sua capacidade e do fator de trabalho. Quanto ao formato, elas podem ser retas ou curvas, possibilitando melhor manobrabilidade do soldador (BRACARENSE, 2003).

2.10.1.2 Ângulo da Tocha (β)

Os ângulos da tocha (β) no processo de soldagem podem variar de 30°, 45° e 90°, conforme mostra a Figura 23.

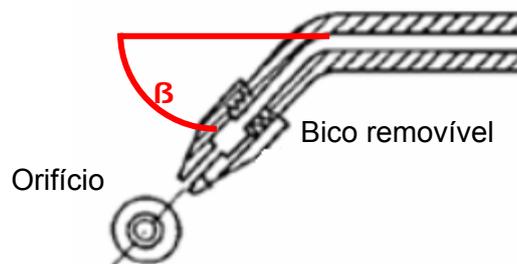


Figura 23 - Ângulo da Tocha (ALMENDRA, et al. 1997)

2.10.1.3 Inclinação de Soldagem

Como em todos processos de soldagem, a inclinação de soldagem (Figura 24) afeta a penetração e a forma do cordão de solda (CAMARGO et al., 2006). A orientação do eletrodo é descrita de 2 formas:

- Pela relação entre o eixo do eletrodo com respeito a direção de soldagem
- Pelo ângulo entre o eixo do eletrodo e superfície de trabalho de soldagem

Quando o eletrodo é mudado da posição perpendicular para uma técnica de ângulo com as outras condições constantes, a penetração diminui e, a forma do cordão de solda fica mais largo e achatado. Penetração máxima é obtida na posição inclinada com técnica de soldagem plana para trás com um ângulo de aproximadamente 25° com a perpendicular. Esta técnica produz uma poça mais convexa e estreita devido a um arco mais estável e menos respingo na peça de trabalho. Para todas as posições, o ângulo normal gira em torno de 5 a 15 graus para bom controle da proteção da poça de fusão. Para alguns materiais como o alumínio, a soldagem à frente é preferível porque provoca a ação de limpeza da poça (cleaning action), reduzindo a oxidação do metal de base.

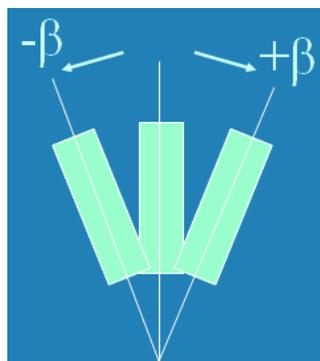


Figura 24 - Inclinação de soldagem no processo "GMAW" (CAMARGO, et al., 2006)

2.10.1.4 Comprimento do Eletrodo ou Stickout

O comprimento do eletrodo ou "stick-out" é a distância entre o final do tubo de contato, e o final do eletrodo, conforme mostra Figura 25. O aumento do comprimento do eletrodo resulta no aumento da resistência elétrica, aumentando assim a temperatura do eletrodo e resultando em um pequeno aumento da taxa de fusão do eletrodo. Globalmente o aumento da resistência elétrica produz uma grande queda de tensão, sendo compensado pela fonte de soldagem com uma redução na corrente que reduz imediatamente taxa de fusão do eletrodo, levando assim a um encurtamento do arco. Assim, a menos que haja um aumento na tensão da máquina de soldagem, o metal vai ser depositado como um cordão estreito e altamente restrito. O stick-out (comprimento do eletrodo) desejável é de 6 a 13 mm para transferência por curto-circuito, e de 13 a 25 mm para as outras formas de transferência (MODENESI, 2000).

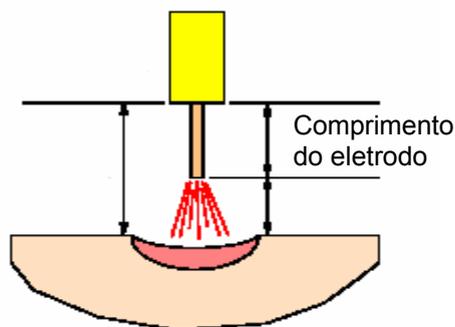


Figura 25 - Comprimento do eletrodo (MODENESI, 2000)

2.10.1.5 Posição do eletrodo

A posição do eletrodo é a distância do contato do eletrodo e o ponto zero da junta a ser soldada, conforme mostrado na Figura 26. Um mal posicionamento do eletrodo pode resultar em uma solda de baixa resistência mecânica em um dos componentes soldados.

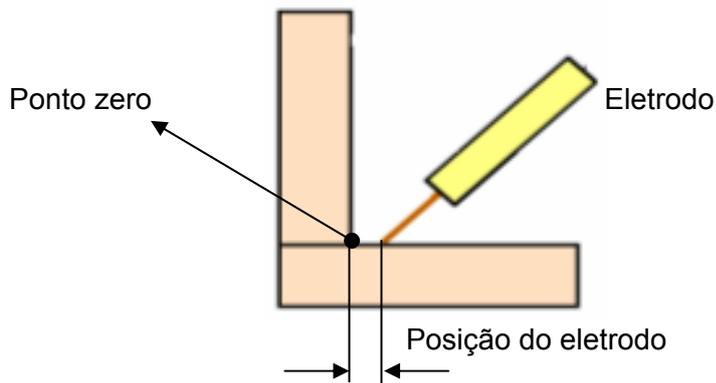


Figura 26 - Posição do eletrodo (do autor)

2.10.1.6 Folga entre as chapas

A folga entre as chapas é a distância oriunda da montagem ou contração devido ao processo de soldagem, conforme mostra Figura 27.

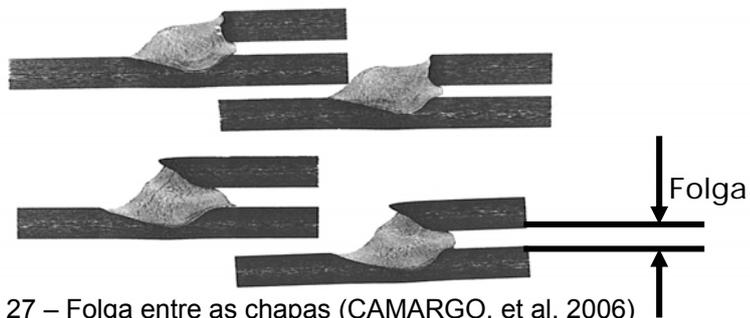


Figura 27 – Folga entre as chapas (CAMARGO, et al. 2006)

2.11 Norma e especificação Qualidade

2.11.1 Garganta

A garganta da parcela realmente soldada, a distância mais curta entre a raiz e a superfície da solda (TSH, 2005), para o critério de aprovação da garganta deve ter no mínimo de 70% da espessura mais fina, como mostra Figura 28.

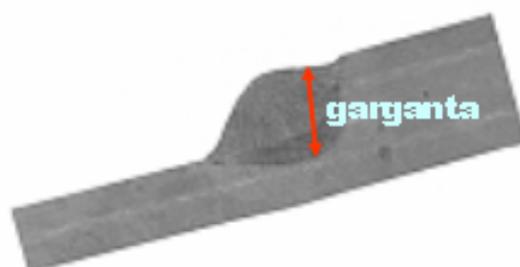


Figura 28 – Garganta da solda (CAMARGO, et al. 2006)

2.11.2 Largura da solda

A largura da solda (Figura 29) é a distância entre ambas as extremidades, ou seja, em uma parcela do metal da solda sem desvio (TSH, 2005). Para o critério de aprovação da largura da solda deve-se ter pelo menos 1,5 vezes a espessura da chapa mais fina.

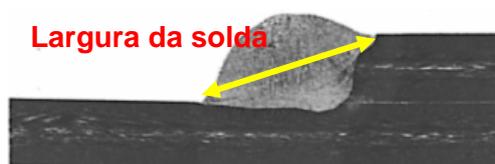


Figura 29 - Largura da solda (CAMARGO, et al. 2006)

2.11.3 Penetração

A penetração (Figura 30) é a profundidade atingida pela zona fundida no metal base (TSH, 2005). Para o critério de aprovação da solda deve-se ter no mínimo de 20% de penetração da espessura da chapa mais fina.

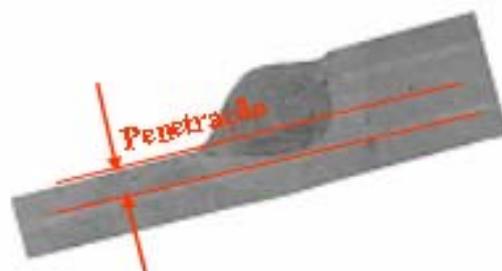


Figura 30 – Penetração da solda (CAMARGO, et al.2006)

2.12 Macrografia

A macrografia (Figura 31) consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, segundo uma secção plana devidamente polida e em regra atacada por um reativo apropriado. O aspecto, assim obtido, chama-se macro-estrutura. O exame é feito à vista desarmada ou com auxílio de lupa. A palavra macrografia é também empregada para designar os documentos que reproduzem a macro-estrutura, ou textura, em tamanho natural ou com ampliação máxima de 10 vezes. Para ampliações maiores, emprega-se o termo micrografia, porque são, em geral, obtidas com o microscópio (COLPAERT, 1974).



Figura 31 - Macrografia de uma junta soldada (COLPAERT, 1974)

3 PROPOSIÇÃO

O presente trabalho buscou associar cada variação dos parâmetros de soldagem (inclinação de soldagem, ângulo da tocha, extensão do eletrodo, posição do eletrodo e folga entre chapas) em junta sobreposta para verificar o resultado da qualidade da solda e identificar qual parâmetro de soldagem é o mais adequado no processo de fabricação. Para isso, foram executados vários testes em uma célula de produção com soldagem "GMAW" robotizado, buscando garantir um sistema de produção eficaz. Como a quantidade produzida de componentes soldados pela indústria automobilística é extremamente elevada, é de suma importância garantir um controle tanto no aspecto de resistência como no aspecto visual. Atualmente, a concorrência entre montadoras tem provocado um aumento em pesquisa e desenvolvimento nos setores produtivos e em consequência, têm-se buscado também a redução de custos e um aumento no índice de produtividade e qualidade total. Portanto, esse trabalho mostra quais parâmetros poderão ser melhores acompanhados e avaliados, tanto de forma qualitativa como quantitativa para o processo de soldagem "GMAW" robotizado.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Materiais

Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizadas chapas de aço de baixo teor de carbono (ABNT 1020), com dimensões originais de 115 x 70 x 2,0 mm, e arame de aço da classe AWS A5 18-2001 ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro, para fabricação de componentes automotivos. Usou-se uma mistura contendo 80% Ar + 20% CO₂ como gás de proteção, com uma vazão de 20 l/min. As amostras foram soldadas pelo processo "GMAW" robotizado, representado na Figura 32.



Figura 32 - Processo "GMAW" robotizado (TSH, 2005)

4.2 Métodos

Para fixação das chapas a serem soldadas, foi construído um dispositivo especial com grampos que garantiu a fixação das chapas na posição com junta sobreposta e não houve qualquer tipo de preparação das superfícies antes da soldagem. Apenas um cordão de solda foi processado e em seguida, foram retiradas duas amostras para a avaliação do parâmetro inclinação de soldagem, que foram

analisadas através de macrografia (penetração, garganta, largura da solda) (TSH, 2005) conforme mostra Figura 33, e pelo aspecto visual (porosidade, furos, falhas no cordão, descontinuidade e mordedura).

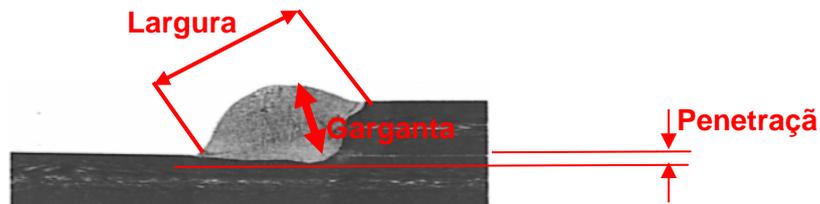


Figura 33 - Avaliação da solda, penetração, garganta e largura (CAMARGO, et al 2006)

Para a realização da soldagem, foi executada a solda puxando a tocha e os parâmetros fixados foram: a corrente, a tensão, a vazão e tipo de gás, o arame de solda e velocidade de soldagem. Utilizou-se o laboratório metalúrgico da empresa Toyota para a análise das amostras, e também as respectivas normas (TSH, 2005) de soldagem e suas especificações.

As avaliações das condições de soldagem foram executadas de forma independentes para o ângulo da tocha Figura 34, inclinação de soldagem Figura 35, extensão do eletrodo Figura 36, posição do eletrodo Figura 37 e folga entre chapas Figura 38, ou seja, em função da disponibilidade do robô no sistema produtivo.

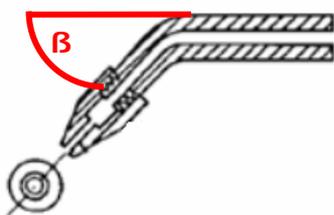


Figura 34 - Ângulo da tocha

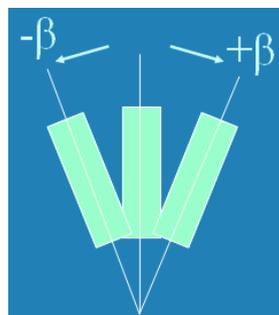


Figura 35 - Inclinação de soldagem

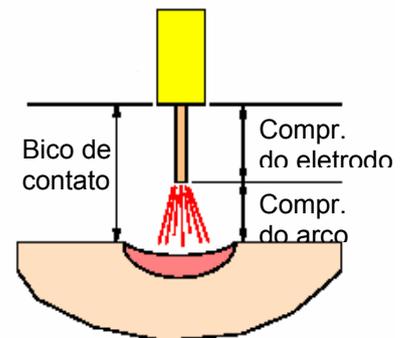


Figura 36 - Extensão do eletrodo

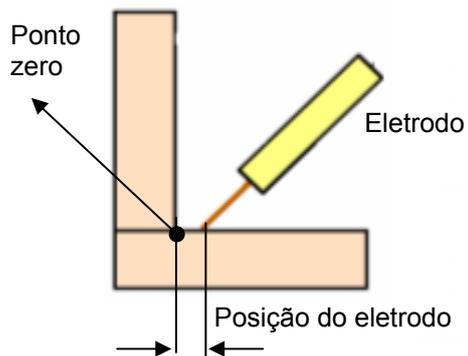


Figura 37 - Posição do eletrodo

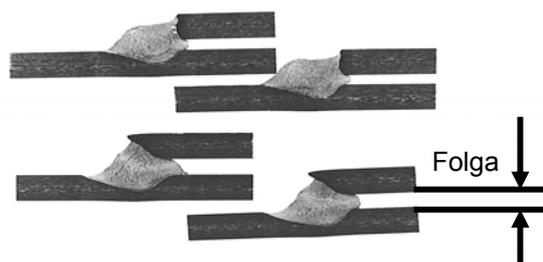


Figura 38 - Folga entre chapas

Na tabela 6, verificam-se as condições de soldagem e as avaliações das amostras na junta sobreposta.

Tabela 6 - Condições de Soldagem

Condição de Soldagem	Condição Fixa	Condição de Exame Qtd.: 2 amostras	Identificação das amostras (IA)
Ângulo da Tocha	-Inclinação: 10° -Extensão: 15 mm -Posição: 0 mm -Folga: 0 mm	a) 30°	1-1
		b) 45°	1-2
		c) 60°	1-3
		d) 90°	1-4
Inclinação de Soldagem	-Ângulo Tocha: 45° -Extensão: 15 mm -Posição: 0 mm -Folga: 0 mm	a) 30°	2-1
		b) 10°	2-2
		c) 0°	2-3
		d) -10°	2-4
		e) -30°	2-5
Extensão do Eletrodo	-Ângulo Tocha: 45° -Inclinação: 10° -Posição: 0 mm -Folga: 0 mm	a) 10 mm	3-1
		b) 15 mm	3-2
		c) 20 mm	3-3
		d) 25 mm	3-4
Posição do Eletrodo	-Ângulo Tocha: 45° -Inclinação: 10° -Extensão: 15 mm -Folga: 0 mm	a) 2 mm	4-1
		b) 1 mm	4-2
		c) 0 mm	4-3
		d) -1 mm	4-4
		e) -2 mm	4-5

Folga entre Chapas	-Inclinação:10° -Extensão: 15 mm -Posição:0 mm	a) 1mm	5-1/ 5-3 / 5-5
		b) 2 mm	5-2 / 5-4 / 5-6

4.3 Metalografia: Preparação de Amostras e Análise quantitativa

A preparação das amostras para análise metalográfica para determinação das dimensões do tamanho do cordão de solda e a análise quantitativa serão descritas a seguir: (BLUCHER; SUBBARAO 1973).

4.3.1 Materiais e Equipamentos

Foram utilizados, materiais de consumo para análise macrográfica em soldas de aço carbono. Os equipamentos utilizados foram os convencionais dos laboratórios metalúrgicos.

4.3.2 Preparação de Amostras

4.3.2.1 Corte

Para o corte das amostras, utilizou-se uma cortadora metalográfica COR-80 com disco abrasivo e sistema de refrigeração para evitar o excesso de deformação e aquecimento na superfície a ser analisada. Para cada tipo de material e de acordo com a sua faixa de dureza, existem discos mais adequados, nesse trabalho utilizou-se disco AA-4. A escolha da secção de corte pode ser (longitudinal ou transversal), dependendo da amostra.(CARAM, 2004).

4.3.2.2 Lixamento

As amostras foram lixadas gradativamente na seqüência de lixas com granulometria mais fina: #220, #320, #400, #600 e #1000 (Poli-triz APL41). Em cada lixa, a amostra deve ser passada no mesmo sentido, sendo que na lixa seguinte, deve-se alternar em 90° o sentido de lixamento, como mostra a Figura 34. O tempo de lixamento em cada lixa é o tempo suficiente para que desapareçam os riscos deixados pela lixa anterior. Finalmente, segue-se uma lavagem cuidadosa, geralmente uma limpeza com ultra-som e secagem (CARAM, 2004).

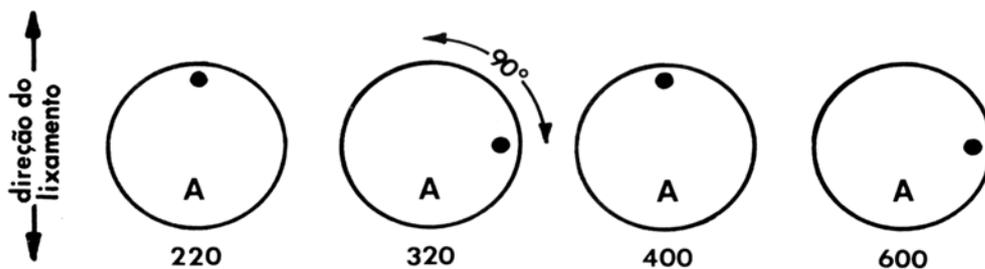


Figura 39 - Rotação da amostra a cada mudança de lixa (CARAM, 2004)

4.3.2.3 Polimento

As amostras foram polidas em politrizes mecânicas com panos abrasivos especiais e lubrificantes, conforme apresentados a seguir:

Polimento grosso: Pano de nylon, pasta de diamante de 6 μm e lubrificante especial para polimento ou álcool. Passa-se a superfície da amostra em todos os sentidos até que todos os riscos de lixa sejam eliminados e a superfície comece a se tornar espelhada. Lavagem cuidadosa (usualmente em ultra-som) e secagem.

Polimento final: Pano macio (tipo camurça) e pasta de diamante 1 μm . Passa-se a amostra em todos os sentidos, diminuindo a pressão no estágio final, durante o tempo necessário para eliminar todos os riscos do polimento grosso e ficar ainda mais espelhada. Lavagem final ainda mais cuidadosa, limpeza em ultra-som para

eliminar resíduos e secagem após passar por álcool ou acetona utilizando ar quente. Neste estágio, a amostra não deve ficar com manchas de secagem.

4.3.2.4 Ataque Químico

O ataque químico é realizado para revelar ou realçar detalhes da microestrutura. Cada material necessita de um determinado tipo de ataque químico para revelar os detalhes de sua microestrutura ou os defeitos. Muitas vezes, faz-se necessária uma consulta bibliográfica para a escolha mais adequada dos reagentes.

No caso específico da presente análise foi utilizado nital 3%: 3% ácido nítrico e 97% álcool etílico com tempo de exposição ao ataque de 5 segundos. Efetua-se uma lavagem em água corrente para eliminar resíduos do ataque, lavagem em álcool ou acetona e secagem em ar quente (CARAM, 2004).

4.3.3 Análise Quantitativa

Foi utilizado um microscópio metalográfico com capacidade de aumento de até 1000 vezes, para análise dimensional das amostras (garganta, largura da solda e penetração) do cordão de solda.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados obtidos para Ângulo da Tocha

As Figuras de 40 a 43, com identificações das amostras (IA), de números 1.1 a 1.4, são representativas das variações do ângulo da tocha (30°, 45°, 60° e 90°), sendo executados dois cortes “a” e “b” para avaliação dimensional da solda (penetração, garganta e largura da solda). As macrografias foram executadas com 10 vezes de aumento, e ataque com Nital 3%.

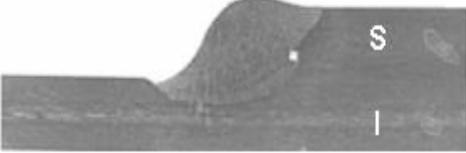
IA No. 1-1	Condições de Soldagem: Ângulo da Tocha (1) Ângulo da tocha: 30° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	1-1 a		1-1 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,0		0,9
		Garganta	2,4		2,6	
		Largura	7,4		7,4	

Figura 40 - Variação do ângulo da tocha para 30°

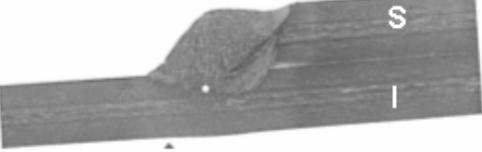
IA No. 1-2	Condições de Soldagem: Ângulo da Tocha (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	1-2 a		1-2 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,0		0,9
		Garganta	2,3		2,3	
		Largura	6,8		7,2	

Figura 41 - Variação do ângulo da tocha para 45°

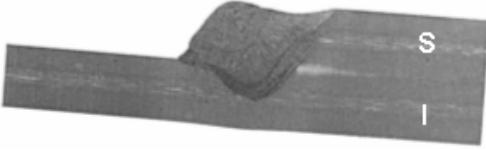
IA No. 1-3	Condições de Soldagem: Ângulo da Tocha (1) Ângulo da tocha: 60° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	1-3 a		1-3 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,4		1,3
		Garganta	2,2		2,2	
		Largura	6,8		6,6	

Figura 42 - Variação do ângulo da tocha para 60°

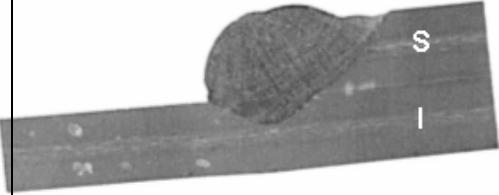
IA No. 1-4	Condições de Soldagem: Ângulo da Tocha (1) Ângulo da tocha: 90° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	1-4 a		1-4 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,8		0,8
		Garganta	2,8		2,6	
		Largura	6,8		6,8	

Figura 43 - Variação do ângulo da tocha para 90°

Nas figuras 44 a 46 a seguir, foram compilados os resultados das análises dimensionais dos cordões de solda (garganta, largura da solda e penetração) feita pela variação do ângulo da tocha, conforme representado anteriormente pelas Figuras 40 a 43.

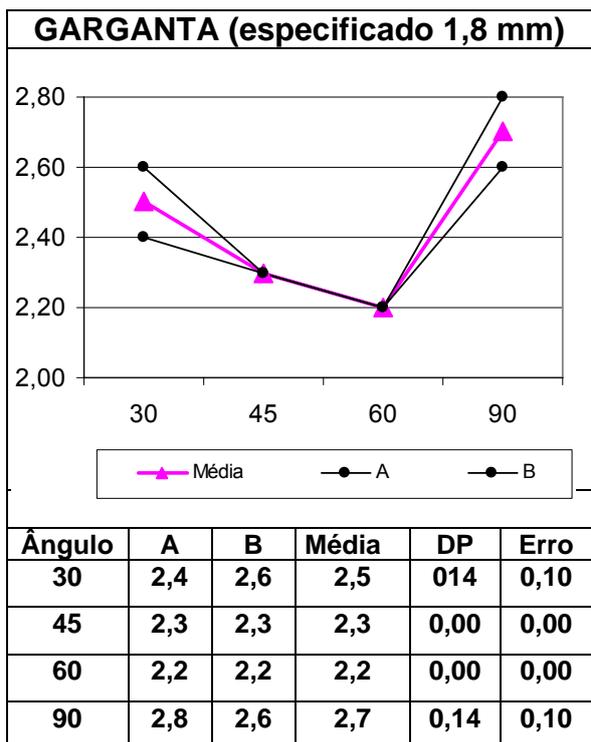


Figura - 44 Variação da garganta da solda

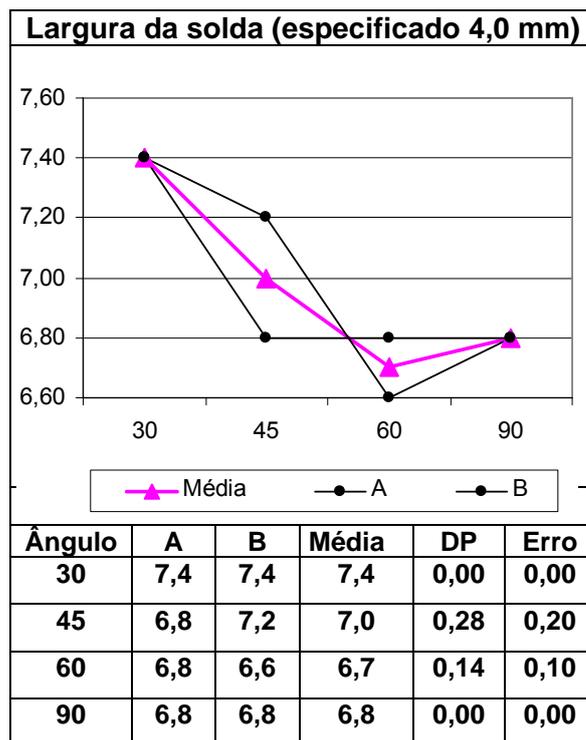


Figura - 45 Variação da largura da solda

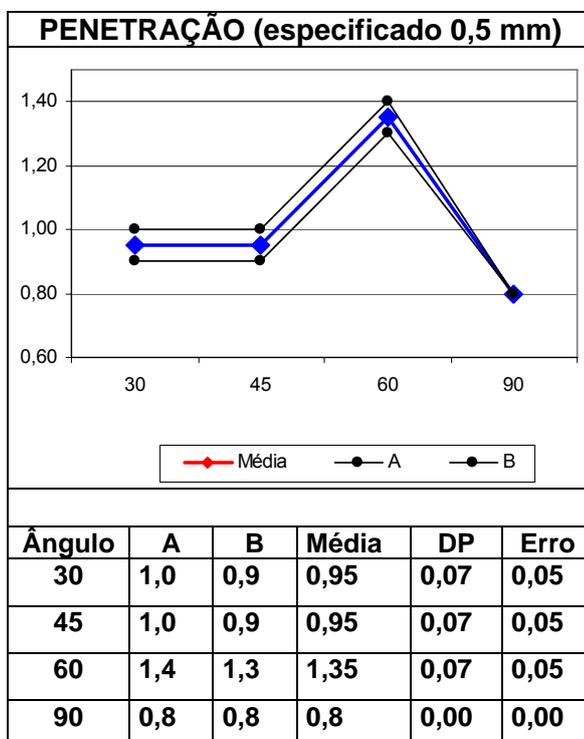


Figura - 46 Variação da penetração da solda

Pela análise da Figura 44, a garganta diminuiu com o ângulo da tocha a 60° em 2,2 mm, mas ficando dentro do especificado (1,8 mm), sendo que o menor desvio padrão (0,0 mm) e o erro da média (0,0 mm) foram para 45° e 60°.

Pela análise da Figura 45, a largura da solda diminuiu com ângulo da tocha de 60°, de 7,4 mm para 6,6 mm, mas ficando dentro do especificado (4,0 mm), sendo que o menor desvio padrão (0,0 mm) e menor erro da média (0,0 mm) foram para 30° e 90°.

Pela análise da Figura 46, praticamente não ocorreu à variação da penetração de solda, sendo que, o menor desvio padrão (0,0 mm), e o erro da média (0,0 mm) foi para 90°.

Após análises das Figuras 44 a 46, foram calculados, as médias, os desvios padrões e os erros das médias para avaliação da garganta, largura e penetração da solda. O melhor parâmetro escolhido do ângulo da tocha foi de 90° para o processo “GMAW” robotizado, devido o desvio padrão e erro da média apresentarem 0,0 mm para largura da solda e penetração. Portanto, a garganta, largura e penetração da solda estão dentro das especificações da norma TSH.

5.2 Resultados obtidos para Inclinação de Soldagem

As Figuras de 47 a 51, com identificações das amostras (IA), de números 2.1 a 2.5, são representativas as variações da inclinação de soldagem (30°, 10°, 0° -10° e -30°), sendo executados dois cortes “a” e “b” para avaliação dimensional da solda (penetração, garganta e largura da solda). As macrografias foram executadas com 10 vezes de aumento, e ataque com Nital 3%.

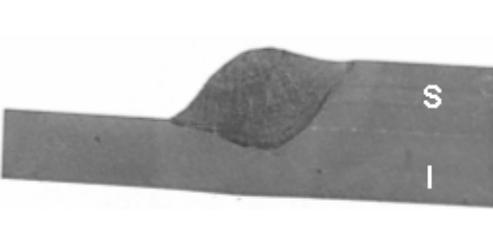
IA No. 2-1	Condições de Soldagem: Inclinação de Soldagem (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 30° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	2-1 a		2-1 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,8		0,7
		Garganta	2,5		2,2	
		Largura	7,2		7,2	

Figura 47 - Variação da inclinação da Solda para 30°

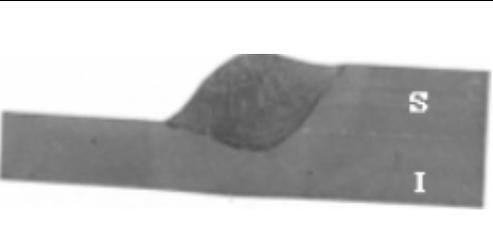
IA No. 2-2	Condições de Soldagem: Inclinação de Soldagem (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	2-2 a		2-2 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,0		0,9
		Garganta	2,3		2,3	
		Largura	6,8		7,2	

Figura 48 - Variação da inclinação da Solda para 10°

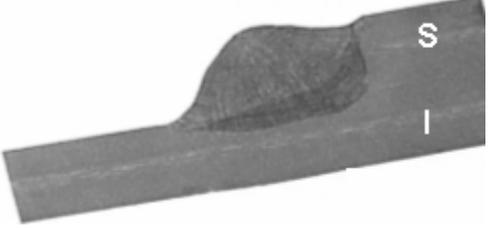
IA No. 2-3	Condições de Soldagem: Inclinação de Soldagem (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 0° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	2-3 a		2-3 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,7		0,9
		Garganta	2,3		2,4	
		Largura	6,6		6,6	

Figura 49 - Variação da inclinação da Solda para 0°

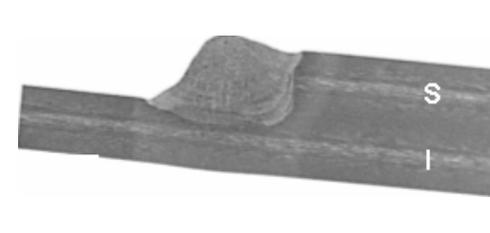
IA No. 2-4	Condições de Soldagem: Inclinação de Soldagem (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: -10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	2-4 a		2-4 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,8	1,0	
		Garganta	2,3		2,3	
		Largura	6,6		6,4	

Figura 50 - Variação da inclinação da Solda para -10°

IA No. 2-5	Condições de Soldagem: Inclinação de Soldagem					
	(1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: -30° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	2-5 a		2-5 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,9	1,0	
		Garganta	2,4		2,4	
		Largura	6,2		6,2	

Figura 51 - Variação da inclinação da Solda para -30°

Nas Figuras 52 a 54 a seguir, foram compilados os resultados das análises dimensionais dos cordões de solda (garganta, largura da solda e penetração) feita pela variação da inclinação de soldagem, conforme representado anteriormente pelas Figuras 47 a 51.

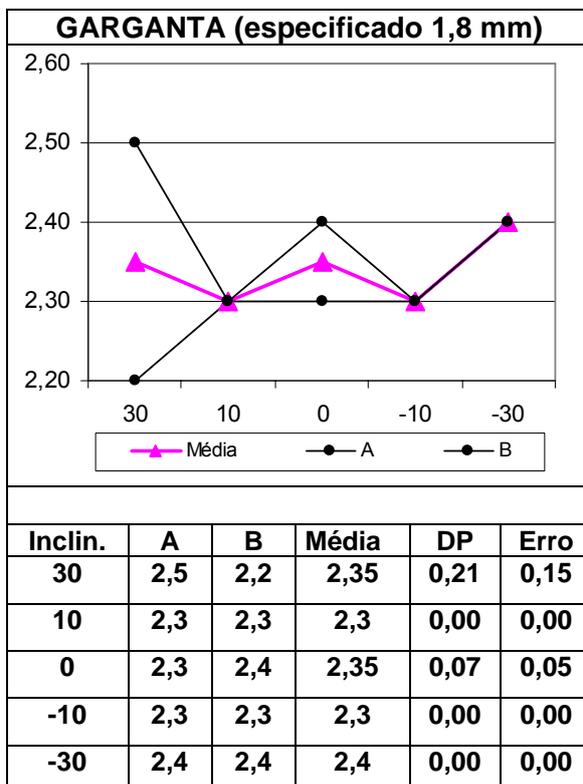


Figura - 52 Variação da garganta

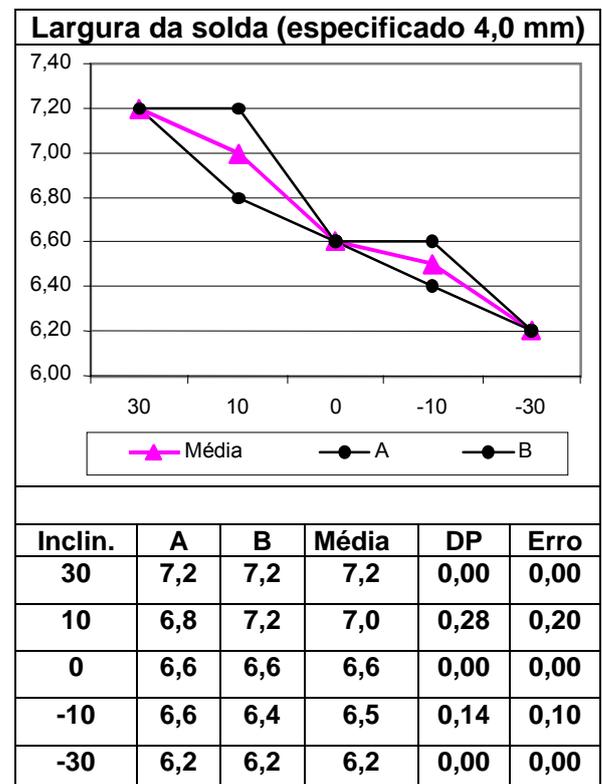


Figura - 53 Variação da largura da solda

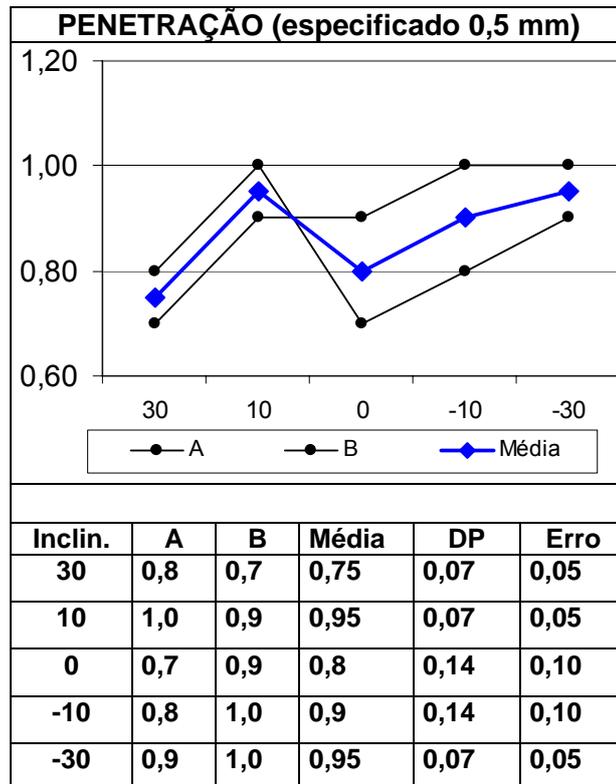


Figura - 54 Variação da penetração da solda

Pela análise da Figura 52, praticamente não ocorreu à variação da garganta da solda, sendo o menor desvio padrão (0,00 mm) e o menor erro da média (0,00 mm), foram para 10°, -10° e -30°.

Pela análise da Figura 53, a largura da solda diminuiu com a inclinação de -30°, de 7,2 mm para 6,2 mm, sendo que o menor desvio padrão (0,00 mm) e o menor erro da média (0,00 mm) foram para 30°, 0° e -30°.

Pela análise da Figura 54, praticamente não ocorreu à variação da penetração da solda, sendo que o menor desvio padrão (0,07 mm) e o menor erro da média (0,05 mm) foram para 30°, 10° e -30°.

Após análises das Figuras 52 a 54, foram calculados as médias, os desvios padrão e os erros das médias para as avaliações da garganta, largura e penetração da solda. O melhor parâmetro escolhido de inclinação de soldagem foi de -30° para o processo "GMAW" robotizado, estando dentro dos 4,0 mm especificado para a largura da solda. Portanto, a garganta, largura e a penetração da solda estão dentro das especificações da norma TSH.

5.3 Resultados obtidos para Extensão do Eletrodo

As Figuras de 55 a 58, com identificações das amostras (IA), de números 3.1 a 3.4, são representativas as variações da extensão do eletrodo (10 mm, 15 mm, 20 mm e 25 mm), sendo executados dois cortes “a” e “b” para avaliação dimensional da solda (penetração, garganta e largura da solda). As macrografias foram executadas com 10 vezes de aumento, e ataque com Nital 3%.

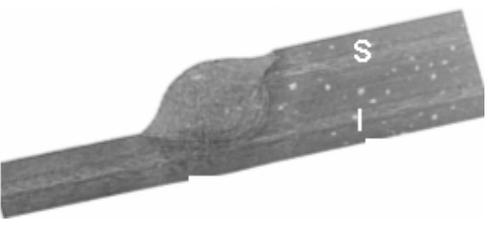
IA No. 3-1	Condições de Soldagem: Extensão do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 10mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	3-1 a		3-1 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,2		1,2
		Garganta		2,3		2,2
		Largura		6,8		6,8

Figura 55 - Variação da extensão do eletrodo para 10 mm

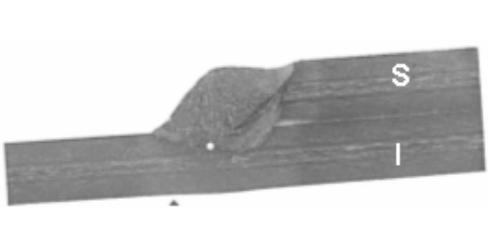
IA No. 3-2	Condições de Soldagem: Extensão do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	3-2 a		3-2 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,0		0,9
		Garganta		2,4		2,6
		Largura		7,4		7,4

Figura 56 - Variação da extensão do eletrodo para 15 mm

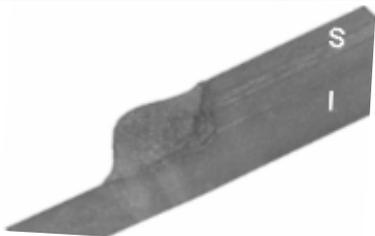
IA No. 3-3	Condições de Soldagem: Extensão do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 20mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
	Aparência					
Análise		Unid.: mm	3-3 a		3-3 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,4		0,5
		Garganta	2,4		2,3	
		Largura	7,3		7	

Figura 57 - Variação da extensão do eletrodo para 20 mm

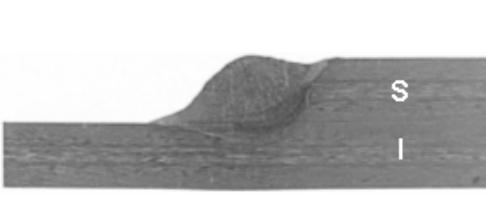
IA No. 3-4	Condições de Soldagem: Extensão do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 25mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
	Aparência					
Análise		Unid.: mm	3-4 a		3-4 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,6		0,5
		Garganta	2,4		2,2	
		Largura	7,4		7,2	

Figura 58 - Variação da extensão do eletrodo para 25 mm

Nas figuras 59 a 61 a seguir, foram compilados os resultados das análises dimensionais dos cordões de solda (garganta, largura da solda e penetração) feita pela variação da extensão do eletrodo, conforme representado anteriormente pelas Figuras 55 a 58.

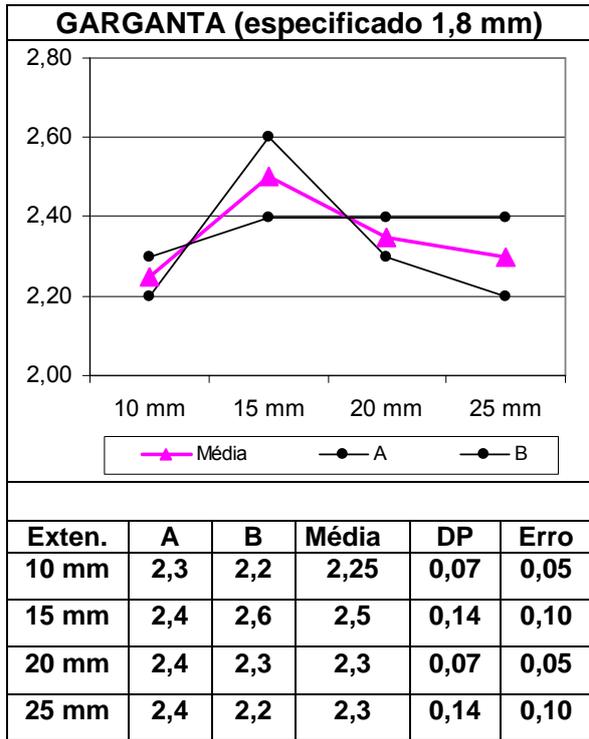


Figura - 59 Variação da garganta da solda

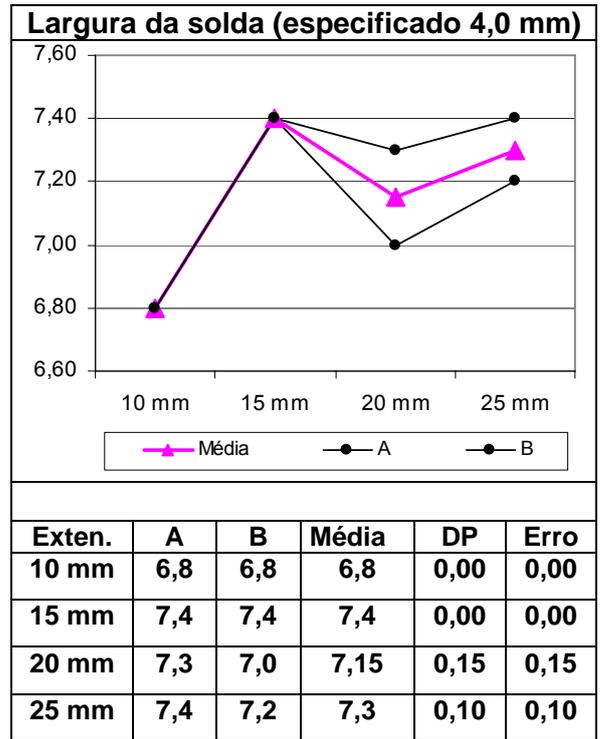


Figura - 60 Variação da largura da solda

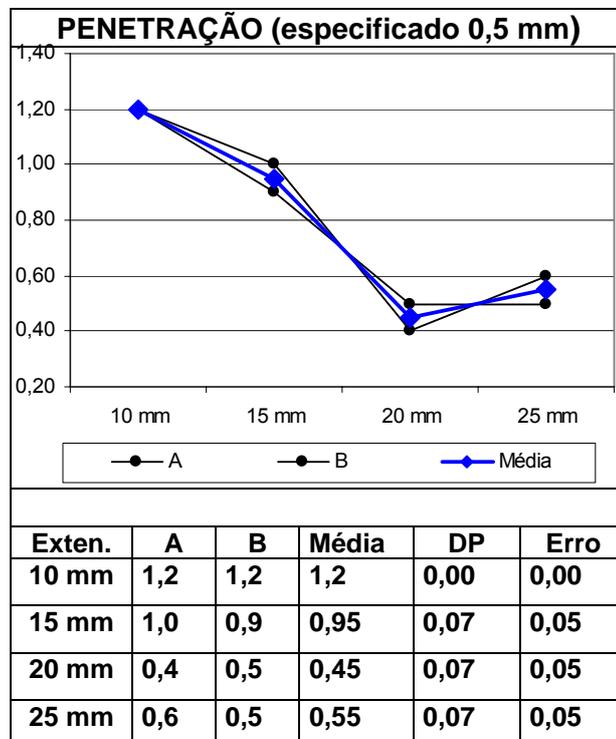


Figura - 61 Variação da penetração da solda

Pela análise da Figura 59, praticamente não ocorreu à variação da garganta, sendo o menor desvio padrão (0,07) e o erro da média (0,05), foram para 10 mm e 20 mm.

Pela análise da Figura 60, praticamente não ocorreu à variação da largura da solda, sendo o menor desvio padrão (0,0 mm) e o erro da média (0,0 mm) foram para 10mm e 15 mm.

Pela análise da Figura 61, a penetração diminuiu com a extensão do eletrodo em 20 mm, de 1,20 mm para 0,40 mm ficando fora do especificado pela norma, sendo que, o menor desvio padrão (0,0 mm), e o erro da média (0,0 mm) foi para 10 mm.

Após análises das Figuras 59 a 61, foram calculados as médias, os desvios padrão e os erros das médias para as avaliações da garganta, largura e penetração da solda. O melhor parâmetro escolhido de extensão do eletrodo foi de 10 mm para o processo "GMAW" robotizado, devido ter obtido menor desvio padrão e erro da média na três avaliações (a garganta, largura e a penetração solda), e estar dentro das especificações da norma TSH.

5.4 Resultados obtidos para Posição do Eletrodo

As Figuras de 62 a 66, com identificações das amostras (IA), de números 4.1 a 4.5, são representativas as variações da posição do eletrodo (2 mm, 1 mm, 0 mm, -1 mm e -2 mm), sendo executadas dois cortes "a" e "b" para avaliação dimensional da solda (penetração, garganta e largura da solda). As macrografias foram executadas com 10 vezes de aumento, e ataque com Nital 3%.

IA No. 4-1	Condições de Soldagem: Posição do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 2.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	4-1 a		4-1 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,4		1,5
		Garganta	2,2		2,2	
		Largura	7,0		7,0	

Figura 62 - Variação da Posição do Eletrodo para 2 mm

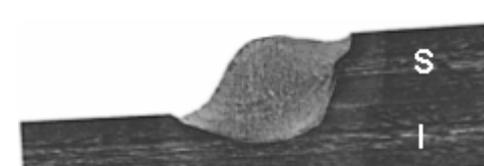
IA No. 4-2	Condições de Soldagem: Posição do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 1.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	4-2 a		4-2 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,1		1,1
		Garganta	2,3		2,2	
		Largura	6,9		6,9	

Figura 63 - Variação da Posição do Eletrodo para 1 mm

IA No. 4-3	Condições de Soldagem: Posição do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	4-3 a		4-3 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,0		0,9
		Garganta	2,3		2,3	
		Largura	6,8		7,2	

Figura 64 - Variação da Posição do Eletrodo para 0 mm

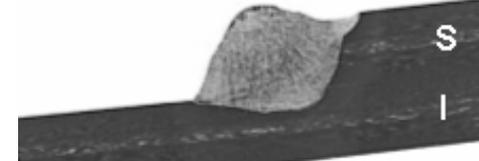
IA No. 4-4	Condições de Soldagem: Posição do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: -1.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	4-4 a		4-4 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,7		0,7
		Garganta	2,5		2,4	
		Largura	6,9		6,9	

Figura 65 - Variação da Posição do Eletrodo para -1 mm

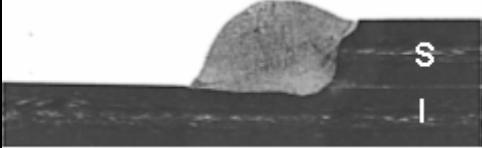
IA No. 4-5	Condições de Soldagem: Posição do eletrodo (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: -2.0 mm (5) Folga: 0.0 mm					
	Aparência 					
Análise		Unid.: mm	4-5 a		4-5 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		0,3		0,4
		Garganta	2,8		2,6	
		Largura		7,0		

Figura 66 - Variação da Posição do Eletrodo para -2 mm

Nas figuras 67 a 69 a seguir, foram compilados os resultados das análises dimensionais dos cordões de solda (garganta, largura da solda e penetração) feita pela variação da posição do eletrodo, conforme representado anteriormente pelas Figuras 62 a 66.

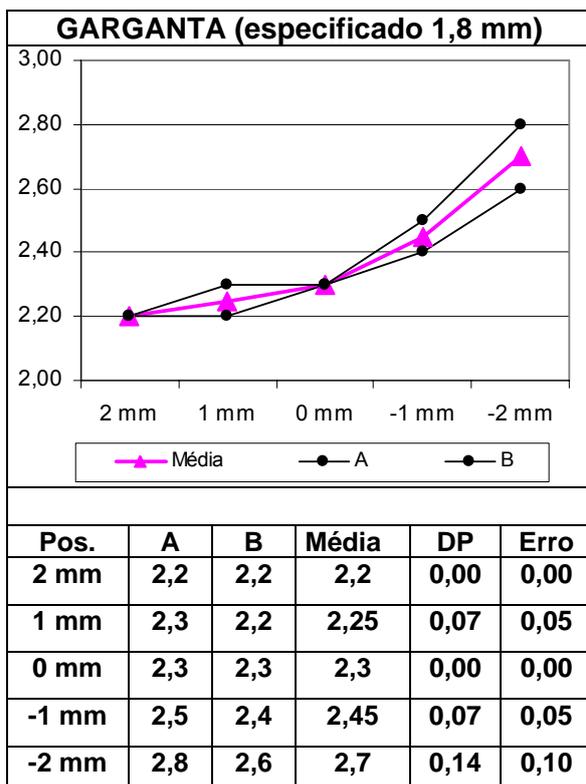


Figura - 67 Variação da garganta da solda

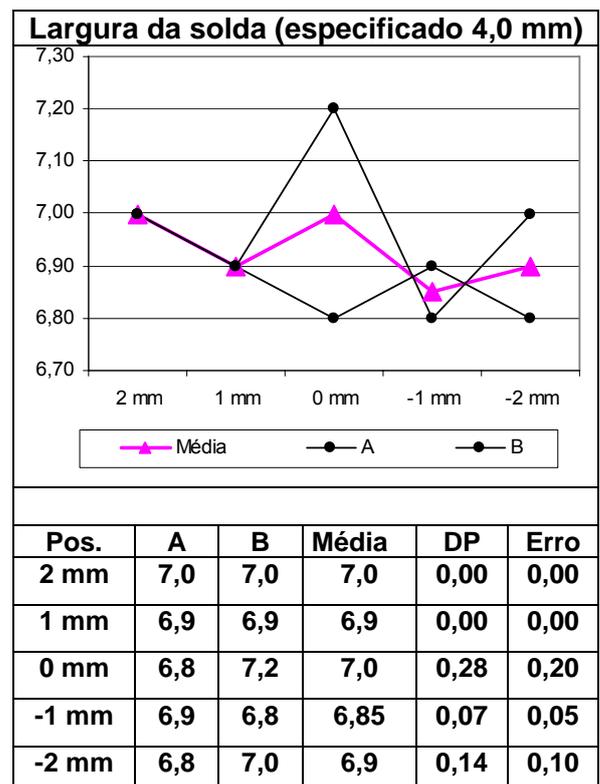


Figura - 68 Variação da largura da solda

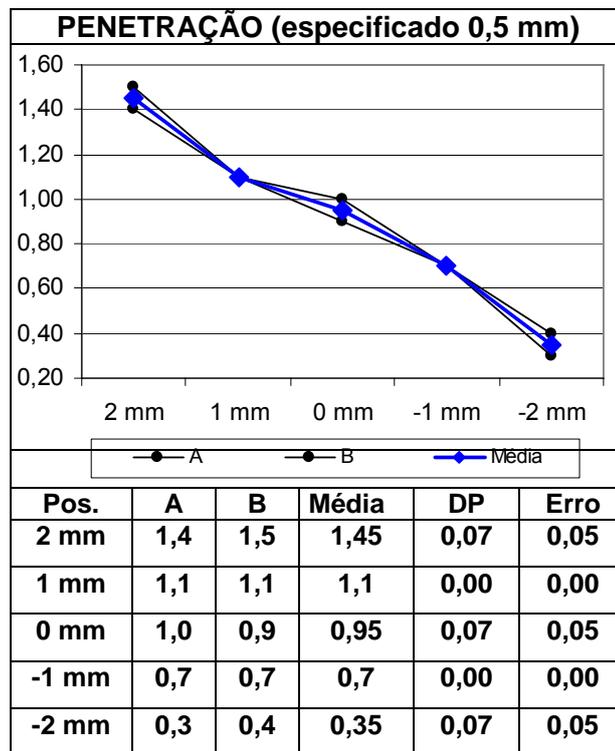


Figura - 69 Variação da penetração da solda

Pela análise da Figura 67, a garganta da solda aumentou com a posição do eletrodo em -2 mm, de 2,2 mm para 2,8 mm, atingindo valores acima do especificado pela norma TSH, sendo que o menor desvio padrão (0,0 mm) e o menor erro da média (0,0 mm) foram para 2 mm e 0,0 mm.

Pela análise da Figura 68, praticamente não ocorreu à variação da largura da solda, sendo o menor desvio padrão (0,0 mm) e o menor erro da média (0,0 mm) foram para 2 mm e 1,0 mm.

Pela análise da Figura 69, a penetração da solda diminuiu com a posição do eletrodo em -2 mm, de 1,5 mm para 0,30 mm, atingindo valores fora do especificado na norma TSH, sendo que, o menor desvio padrão (0,0 mm), e o erro da média (0,0 mm) foram para 1 mm e -1 mm.

Após análises das Figuras 67 a 69, foram calculados as médias, os desvios padrão e os erros das médias para as avaliações da garganta, largura e penetração da solda. O melhor parâmetro escolhido de posição do eletrodo foi de 2 mm para o processo "GMAW" robotizado, devido ter obtido menor desvio padrão e erro da média na três avaliações (a garganta, largura e a penetração solda), e estar dentro dos valores especificados na norma TSH.

5.5 Resultados obtidos para Folga entre Chapas

As Figuras de 70 a 75, com identificações das amostras (IA), de números 5.1 a 5.6, são representativas as variações da folga entre chapas (1 mm, 2 mm), sendo executados dois cortes "a" e "b" para avaliação dimensional da solda (penetração, garganta e largura da solda). As macrografias foram executadas com 10 vezes de aumento, e ataque com Nital 3%.

IA No. 5-1	Condições de Soldagem: Folga entre chapas (1) Ângulo da tocha: 30° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 1.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	5-1 a		5-1 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,0		1,1
		Garganta		3,8		3,0
		Largura		6,4		6,5

Figura 70 - Variação da folga entre chapas para 1 mm

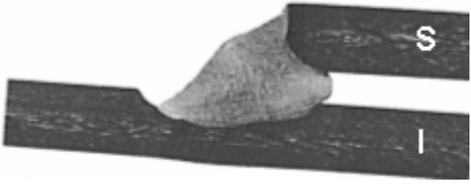
IA No. 5-2	Condições de Soldagem: Folga entre chapas (1) Ângulo da tocha: 30° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 2.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	5-2 a		5-2 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,3		1,2
		Garganta	2,7		3,7	
		Largura	2,7		3,7	

Figura 71 - Variação da folga entre chapas para 2 mm

IA No. 5-3	Condições de Soldagem: Folga entre chapas (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 1.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	5-3a		5-3 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,3		1,1
		Garganta	3,0		3,0	
		Largura	6,2		6,2	

Figura 72 - Variação da folga entre chapas para 1 mm

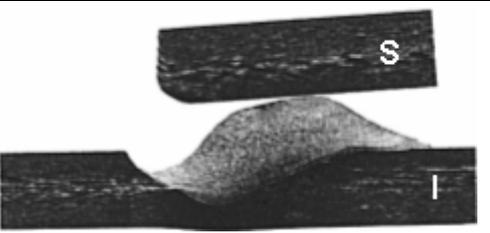
IA No. 5-4	Condições de Soldagem: Folga entre chapas (1) Ângulo da tocha: 45° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 2.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	5-4 a		5-4 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração	0,0	1,6	0,0	0,0
		Garganta	0,0		0,0	
		Largura	0,0		0,0	

Figura 73 - Variação da folga entre chapas para 2 mm

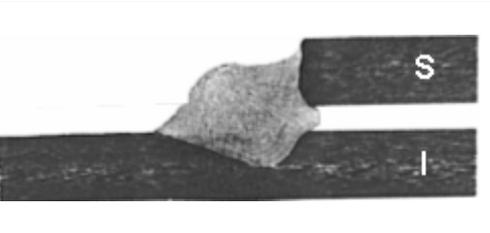
IA No. 5-5	Condições de Soldagem: Folga entre chapas (1) Ângulo da tocha: 60° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 1.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	5-5 a		5-5 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,2		1,3
		Garganta	2,0		2,0	
		Largura	6,0		6,2	

Figura 74 - Variação da folga entre chapas para 1 mm

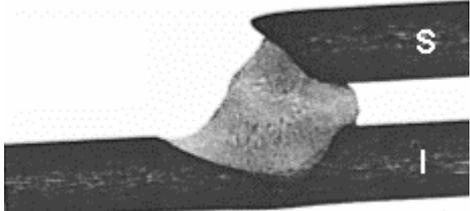
IA No. 5-6	Condições de Soldagem: Folga entre chapas (1) Ângulo da tocha: 60° (2) Inclinação de Soldagem: 10° (3) Extensão: 15mm (4) Posição do eletrodo: 0.0 mm (5) Folga: 2.0 mm					
Aparência						
Análise		Unid.: mm	5-6 a		5-6 b	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
		Penetração		1,6		1,6
		Garganta	2,7		2,6	
		Largura	4,7		4,8	

Figura 75 - Variação da folga entre chapas para 2 mm

Nas figuras 76 a 78 (folga de 1 mm) e 79 a 81 (folga 2 mm) a seguir, foram compilados os resultados das análises dimensionais dos cordões de solda (garganta, largura da solda e penetração) feita pela variação da posição do eletrodo, conforme representado anteriormente pelas Figuras 70 a 75.

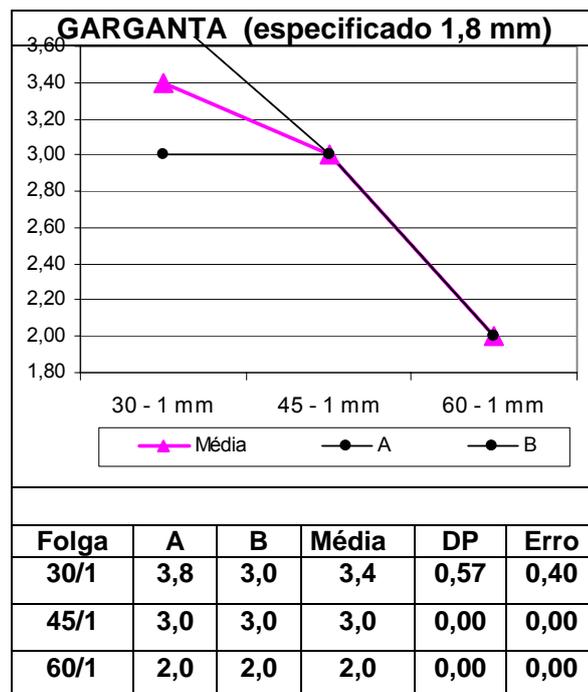


Figura 76 - Variação da garganta (1 mm).

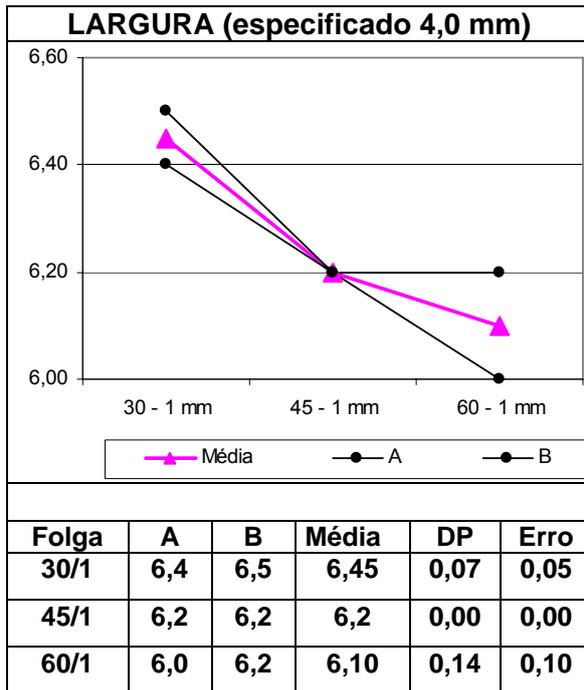


Figura 77 - Variação da largura da solda (1 mm).

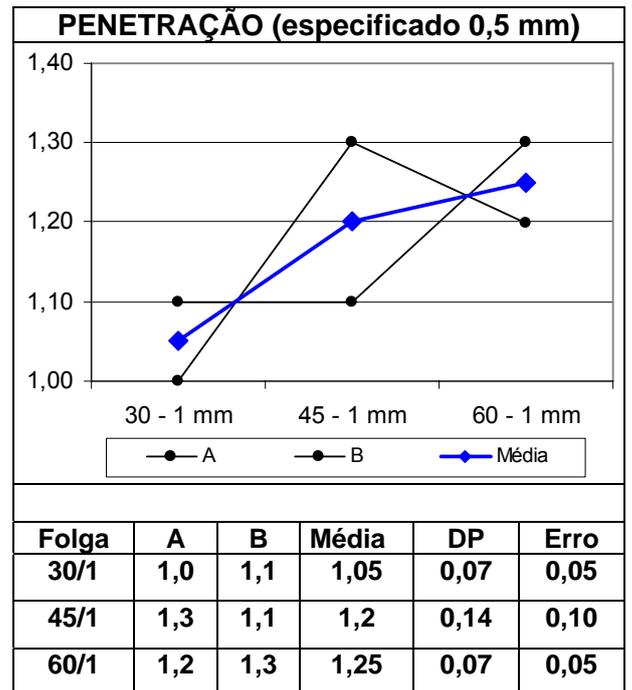


Figura 78 - Variação da penetração (1 mm).

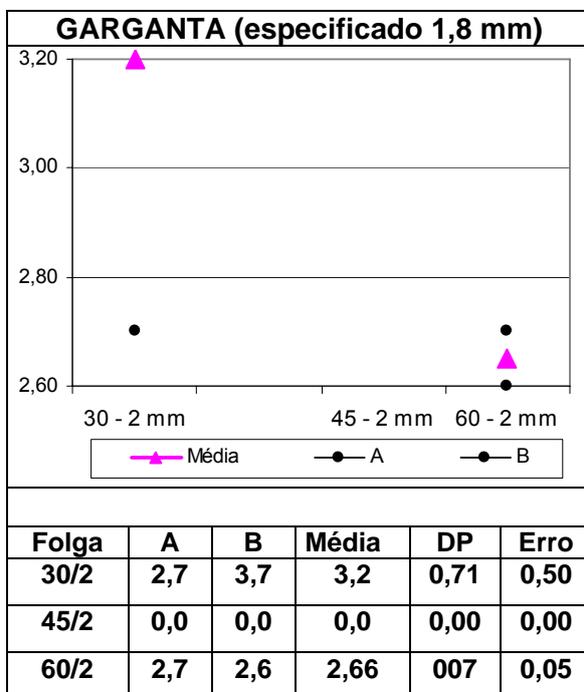


Figura 79 - Variação da garganta (2 mm).

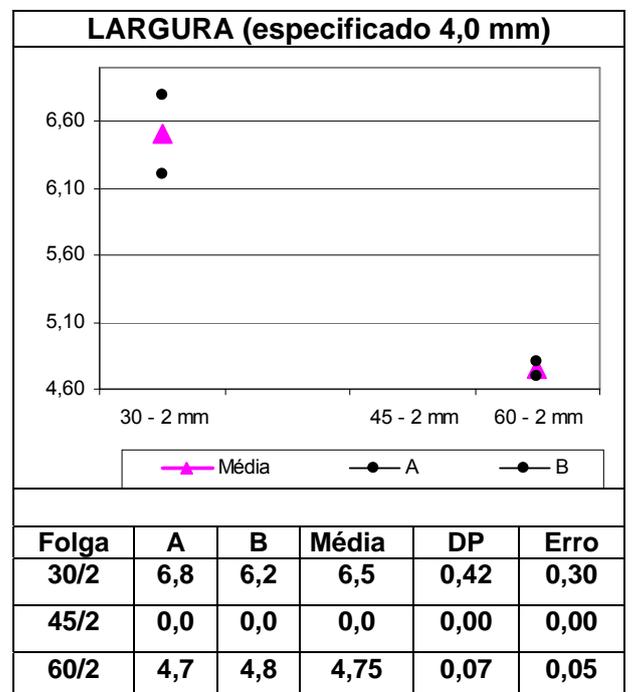


Figura 80 - Variação da largura da solda (2 mm).

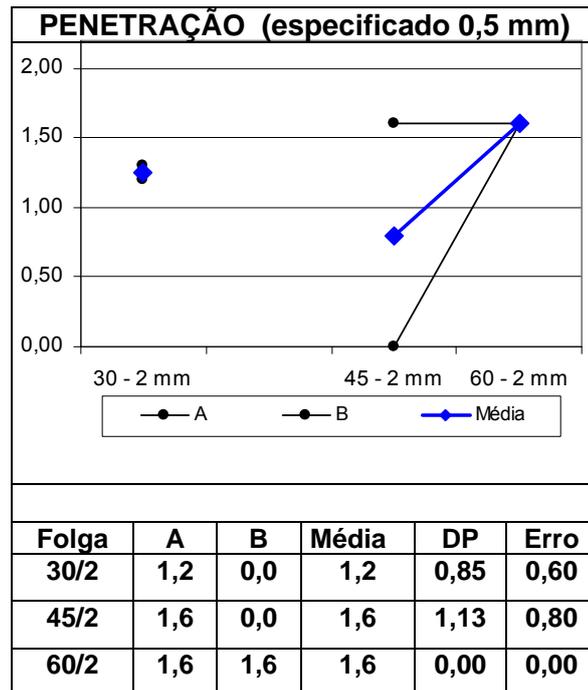


Figura 81 - Variação da penetração (2 mm).

Pela análise da Figura 76, a garganta da solda diminuiu com a folga (1 mm) em 60°, de 3,8 mm para 2,0 mm, sendo que o menor desvio padrão (0,0 mm) e o erro da média (0,0 mm) foram para 45° e 60°.

Pela análise da Figura 77, a largura da solda diminuiu com a folga (1 mm) em 60°, de 6,5 mm para 6,0 mm, sendo que o menor desvio padrão (0,0 mm), e o erro da média (0,0 mm) foi para 45°.

Pela análise da Figura 78, a penetração aumentou com a folga (1 mm) em 60°, de 1,0 mm para 1,3 mm, sendo que o menor desvio padrão (0,07 mm) e o erro da média (0,05 mm) foram para 30° e 60°.

Pela análise das Figuras 79, 80, e 81 para os ângulos de 30°, 45°, 60° e folga de 2 mm, a garganta da solda, largura da solda e penetração as soldas não apresentaram dentro do especificado em norma TSH e uma boa qualidade no cordão de solda.

Após análises das Figuras 76 a 81, foram calculados as médias, os desvios padrões e os erros das médias para as avaliações da garganta, largura e penetração da solda. O melhor parâmetro escolhido de posição do eletrodo foi de 1 mm com 45° para o processo "GMAW" robotizado, e estar dentro dos valores especificados na norma TSH.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir:

- a) A metodologia empregada para o processo "GMAW" robotizado com relação às análises dos cordões de solda se mostrou eficiente dentro das especificações da norma Toyota TSH.
- b) Após uma análise prática e estatística das variáveis existentes, os melhores parâmetros escolhidos foram: ângulo da tocha 90° , inclinação de soldagem -30° , extensão do eletrodo 10 mm, posição do eletrodo 2 mm e folga entre chapas 1 mm a 45° para o processo "GMAW" robotizado.
- c) Para condições de folga de até 1 mm deve-se utilizar arames normalizados, acima dessa espessura como por exemplo (1,2 mm), sendo que inferior, como por exemplo 0,8 mm, acarretaria na reprovação da solda.
- d) Para valores inferiores de extensão de eletrodo, na faixa de 10 mm, terá o efeito de aumentar a corrente de soldagem, esse fato provocará um aumento na penetração da solda. Para uma extensão do eletrodo excessivamente grande, na faixa de 20 a 25 mm, reduzirá a eficiência da proteção do gás, também reduzirá a corrente fornecida pela fonte e conseqüentemente valores baixos de penetração.

O presente trabalho motiva os engenheiros e pesquisadores a continuação dos estudos no sentido de avaliar e fundamentar individualmente os parâmetros de soldagem no processo "GMAW" robotizado. Com isso, visa dar contribuições relevantes ao desenvolvimento dos sistemas produtivos das indústrias automobilísticas.

REFERÊNCIAS

ABENDE. Ensaio visual e dimensiona de soldas in: (Procedimento de END). São Paulo, 2004.

ALCAN. **Manual de Soldagem** 1ª ed. São Paulo: Alcan, 1993.

ALCHELE, G. ET AL. The contact-tube distance in gas-shilded metal-arc welding How does it work? in: **Welding and cutting.** , 2002. p. 80-83.

ALMENDRE C.; SILVA T.; RAMALHO J. Soldagem in: São Paulo: Senai, 1997.

ALTSHULLER, B. A Guide to GMAW welding of aluminum. In: *Welding Journal*, USA, p. 49-55, June. 1998

AWS, Standard for AWS *certification of welding inspectors*; American Welding Society USA, 1988.

AWS, AWS B2.1 Standard *for welding Procedure and performance Qualification* American Welding Inspection Society, USA 1999.

AWS, *Welding Inspection- American Welding Society USA*, 1980.

AWS, *Welding Handbook*, American Welding Society, vol. 1 pp. 7-10 e vol. 2 pp. 109-155, 8a Edição, USA, 1991.

BARRA, S. R. **Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco** 1999. Doutorado em Engenharia - Universidade Federal de Santa Catarina.

BARRA, S. R. Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometri da zona fundida. Santa Catarina, 2003.

BEGHINI, M.; BENAMATI, G.; BERTINI, L. and VALENTINI, R. "Effect of Hydrogen on Tensile Properties of Martensitic Steels for Fusion Application", *Journal of Nuclear Materials*, vols. 258-263, pp. 1295-1299, 1998.

BONANNI, C. G. A utilização de projeto e análise experimentos aplicados em soldagem: un estudo de caso. **Universidade Federal de Itajubá**, 2004.

BRACARENSE, A. Q. *Gas Metal Arc Welding*. Artigo Infosolda, 2003.

BRACARENSE, A., et al. , *A soldagem GMAW (ou MIG – MAG)*, *Revista da Soldagem*, ABS, p. 6-17, Ano II Nº 5 – 2004

BLUCHER, E.; SUBBARAO , E.C. et. *Experiências de Ciência dos Materiais*, 1973

CAMARGO, J. R. ; ARTHUZO, A. ; MIRON, L.; CAMILO, M. ; CHAVES C. Estudo da influência da inclinação de soldagem no processo "GMAW" robotizado *In: II WORKSHOP COOPERAÇÃO UNIVERSIDADE- EMPRESA UNEM*, Taubaté. São Paulo:, 2006.

CARAM, R. Metalografia: Preparação de amostras e análise quantitativa, 2004.

CHAE, Y. M. et al. A New Instantaneous Output Current Control Method for Inverter Arc Welding Machine. IEEE. p. 521-526. 1999.

COLPAERT, H., *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*, 3 ed. Editora Edgard Blucher, São Paulo 1974.

COLLARD, J.F., "Adaptive pulsed GMAW control: The digipulse system", *Welding Journal*, pp. 35-38, Nov. 1988.

COMERCIAL GERDAU. Arame para Solda MIG/MAG (GMAW) São Paulo, 2006. disponível em < www.comercialgerdau.com.br/produto/catalogo. Acesso em: 12 out. 2006.

COSTA, U. Qual a importância do "Stickout" na soldagem MIG/MAG e arame tubular. *In: Soldagem & Inspeção*, São Paulo, nº 1, p.54-55, Maio. 1995

COSTA, A. V.; SCOTTI, A.; OLIVEIRA, S. A. G. Influência de defeitos na resistência de juntas soldadas de alterações veiculares *In: XXIV ENCONTRO NACIONAL TECNOLOGIA DA SOLDAGEM*, Fortaleza, 1998.

CULLISON, A. Get That Spatter under Control. *Welding Journal*, Miami, v. 78, n. 4, p. 43-45, Apr. 1999.

DAVIES, A.C., "The science and practice of welding". vol.2, Cambridge University Press, Tenth edition, 1996.

DENNIS, J. et al. The effects of welding parameters on ultra-violet emissions, ozono and CrVi formation in MIG welding. *In: Annals of Occupational hygiene*, Great Britain, Vol. 41, nº 1, p. 95-104, 1998.

DIETZEI, W. and PFUFF, M. "The Effect of Deformation Rates on Hydrogen Embrittlement", *Hydrogen Effects in Materials*, A. W. Thompson and N. R. Moody (eds.), The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 303-311, 1996.

DILLENBECK, V. R. et al. The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel. *Welding Journal*, Miami, v. 66, n. 9, p. 45-49, Sep. 1987.

DUTRA, J.C., "Manual da fonte de soldagem Inversal 450". Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

FORTES, C. Engenheiro Metalúrgico, MSc. *Soldagem MIG/MAG*. Assistência Técnica de Consumíveis – ESAB BR, 2004.

FORTELE, I. C. Equipamentos e serviços para área de controle de qualidade de ensaios metalográficos físicos e químicos São Paulo, 2006. disponível em <www.fortel.com.br>. Acesso em: 16 out. 2006.

FROME, E. Soldagem a Arco MIG/MAG (GMAW). disponível em: <<http://unb.br/ft/enm/vortex/fto/tecmecc2/mig%20mag.pdf>>. Acesso em : 24 set. 2006.

GIMENES, L.; RAMALHO, J. P. Introdução MIG/MAG. Infosolda, disponível em < www.infosolda.com.br/download/61dpe.pdf. >. Acesso em: 06 set. 2006.

GOLÇALVES E SILVA, R. H. Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito e controle aplicada ao passe de raiz in: Florianópolis, 2005.

GOLÇALVES, L. S. B; MIRANDA, H. C.; PONOMAREV, V. Utilização de sensor óptico no controle da transferência metálica do processo MIG/MAG pulsado. Jul. de 2006.

GOHR, JR. R. Projeto e realização de uma fonte de energia para soldagem multiprocesso. Projeto submetido à FUNCITEC, Nov. 2004.

GRAIG, E. A unique mode of GMAW transfer . **Welding Journal**, 1987. p. 51-56,

INES, P. GMAW-Gas Metal Arc Welding São Paulo, 2006.
<<http://dSPACE.ist.uti.pt/brtstream>>. Acesso em: 24 de setembro.

IRVING, Bob. Trying to Make Some Sense Out of Shielding Gases. *Welding Journal*, Miami, v. 73, n. 5, p. 65-70, May. 1994.

IRVING, B. Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding. *Welding Journal*. Miami, v. 78, n. 1, p. 37-41, Jan. 1999.

KIM, S. & EAGAR, W., "Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding". *Welding Journal*, pp.379-387, Jul. 1993.

LINNERT, G.E., "Welding metallurgy – Vol 1". New York: American Welding Society, Third Edition, 1965.

LIU, S.; SIEWERT, A. Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate. *Welding Journal*, Miami, v. 68, n. 2, p.52-58, Feb. 1989.

LUNARSKA, E.; OSOSKOV, Y.; and JAGODZINSKY, Y. "Correlation Between Critical Hydrogen Concentration and Hydrogen Damage of Pipeline Steel", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 22, n. 2/3, pp. 279-284, 1997.

MACHADO, I. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Livro, 1ª Edição, Porto Alegre, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE A. Q. Soldagem Fundamentos e Tecnologia in: : UFMG, 2005.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Introdução aos Processos de Soldagem. In Departamento de Engenharia Metalúrgica-UFMG, 2000.

MERKLE, B. Equipamentos de soldagem LTDA São Paulo, 2006.
<www.merkle.com.br>. Acesso em: 12 de outubro.

MODENESI, P. J. *Técnica Operatória da Soldagem GMAW*, 2000.

MODENESI, P. J. Descontinuidade e Inspeção em juntas soldadas in: Belo Horizonte, 2001.

MODENESI, P. J. *Fontes de energia para a soldagem a Arco* in: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2005.

MODENESI, P. J. Transferência de Metal na Soldagem GMAW (MIG/MAG), 2002.

MODENESI, P. J. Introdução à Física do Arco Elétrico in: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2005.

MORAES, J. Inovações tecnológicas abrem novas perspectivas para fabricantes de gás, equipamentos e consumíveis **Metalurgia & Materiais**, 2005.
<www.revistametalurgia.com.br>. Acesso em: 07 out.

NORRISH, J.; RICHARDSON, I. F., "Back to basics: metal transfer mechanisms", *Welding & Metal Fabrication*, Jan-Fev, pp. 17-22, 1988.

NORRISH, J.; "Advanced Welding Processes", IOP Publishing Ltd, 375 pp, 1992.

MOYER, N. The Evolution of Shielding Gás. *Welding Journal*, Miami, v. 81, n. 9, p. 51-52, Sep. 2002.

OKUMURA, K. et al. Fuzzy Expert System for Robotic Arc Welding. In: *Welding and Joining Processes*. PED - Vol 51. ASME, 85-90, 1991.

PEIXOTO, A. L., et al., *Soldagem GMAW Convencional em CCEN utilizando consumível ER 309L sobre chapas de aço 1020*, 2004.

PEREIRA, W. A. Artigo Comportamento do Cordão na Soldagem GMAW Pulsada em chanfros estreitos, 2001.

PEREIRA, W. A.; FERRARESI, V. A. Comportamento do cordão na soldagem GMAW pulsada em chanfros estreitos *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, COBEF*, , 2001.

POUND, B. G, "Hydrogen Trapping in High-Strength Steels", *Acta Mater.*, vol. 46, n. 16, pp. 5733-5743, 1998.

PRESSOUYRE, G. M. and FAURE, F. M. "Quantitative Analysis of Critical Concentrations for Hydrogen-Induced Cracking", in *Hydrogen Embrittlement: Prevention and Control*, Louis Raymond (ed.), pp. 353-371, STP 962, ASTM, Philadelphia, USA, 1988.

QUITES, A. et al. *Tecnologia da soldagem a arco Voltaico*. Livro, Florianópolis, EDEME, 1979.

RYAN, P. Tips on Welding Aluminum with the GMAW Process. In : *Welding Journal*, USA, p. 43-45, December. 1988.

SADLER, H. A. Look at the Fundamentals of Gas Metal Arc Welding. In: *Welding Journal*, USA, p. 45-47, May. 1999.

SCOTTI, A.. "*Process Modelling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW*", Phd Thesis, Cranfield Institute of Technology, UK, Set de 1991, 273p.

SILVA, R. H. G. Desenvolvimento da Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito com controle de corrente para aplicação em passes de raiz 2006. <http://labsolda.ufsc.br/projetos_atuais/mig_mag_cc.htm>. Acesso em: p.e: 10 abr 2006.

STENBACKA, N.; PERSSON, K. A., "Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal*, vol. 68, no 11, pp. 41 – 47, 1989.

STREET, J. A. Pulsed Arc Welding. In: Abington Publishing Special Report, Cambridge, 1990

TAGUCHI, G., Taguchi on robust technology development: bringing quality upstream by Genichi Taguchi. New York, ASME press, 1993.

TSH. *Solda Arc Welding*. "definition of properties", p 2-10. Rev. 2, 2005.

UNB. Soldagem a Arco MIG/MAG (GMAW) São Paulo, 2006. <www.unb.br/ft/enm/vortex/ftp/tecmecl/mig%20maç.pdf>. Acesso em: 04 out. 2006.
UNB. Automação na Soldagem. São Paulo, 2006
< www.unb.br/ft/enm/vortex >. Acesso em: 13 mai. 2006.

VAIDYA, V. Shielding gas mixtures for semiautomatic welds. *Welding Journal*. Miami, v. 81, n. 9, p.43-48, set 2002.

WAINER, E.; BRANDINI, S.D.; MELLO, F.D. *Soldagem Processo e Metalurgia*. Editora Edgard Blucher, 2004.

WAINER, E. et al. Soldagem: Processos e Metalurgia. Livro, 1ª Edição, São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1992

WEBER, J., 1982, "Pulsed GMAW a plus for Midwestern metalworker". Welding Journal, November, pp.51-52.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)