

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS SOBRE A GEOMETRIA DOS CORDÕES PRODUZIDOS
POR SOLDAGEM MAG ROBOTIZADA

por

Diego Rafael Alba

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Janeiro de 2013.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS SOBRE A GEOMETRIA DOS CORDÕES PRODUZIDOS
POR SOLDAGEM MAG ROBOTIZADA

por

Diego Rafael Alba

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projetos e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Ivan Guerra Machado

Porto Alegre, 9, Janeiro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que em nenhum momento deixou de acreditar em mim e medir esforços para eu cumprir esta importante etapa.

Mãe, sem teu amor e dedicação eu nunca estaria aqui hoje. Te amo muito!

Pai, obrigado por sempre acreditar em mim e sempre estar do meu lado. Tua hombridade e garra são exemplos a serem seguidos.

Obrigado a minha irmã Cinthya que sempre me apoiou nesta jornada e a minha sobrinha Letícia a qual eu amo demais.

Um agradecimento aos meus amigos, Alexandre Mandelli, Franco Tedesco, Eduardo Menezes e aos irmãos Luis Felipe Knies e Rodolfo Antonio Knies. Afinal, amigos são a família que escolhemos.

A todos do *Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC)* que sempre estiveram dispostos a me ajudar na realização deste trabalho, meu muito obrigado.

*“A lei da mente é implacável.
O que você pensa, você cria;
O que você sente, você atrai;
o que você acredita, torna-se realidade.”*

Desconhecido

ALBA,D.R., **Influência dos parâmetros sobre a geometria de cordões produzidos por soldagem MAG Robotizado** 2012. 28f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Com o intuito de analisar possíveis ganhos de produtividade e qualidade em soldagem utilizando a robótica, este trabalho procurou através da análise da geometria do cordão de solda, verificar a influência da velocidade de soldagem no processo MAG. Desta forma, a soldagem MAG robotizada foi realizada na forma de simples deposição (bead-on plate). O metal base foi um aço baixo carbono (SAE 1008) e o eletrodo foi classificado como AWS ER70S-6. Foram empregadas diversas combinações de parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem) e como gás de proteção foi utilizado uma mistura de Ar+10%CO₂. Os resultados mostram que é grande a influência da velocidade de soldagem nas características dos cordões de solda. Foi visto que para grandes velocidades as dimensões de reforço e penetração são afetadas. Em contrapartida grandes velocidades de soldagem diminuem o tempo de arco elétrico aberto o que possibilita a redução dos custos da solda.

PALAVRAS-CHAVE: MIG/MAG, Soldagem Robotizada, Velocidade de soldagem, Energia de soldagem, Bead-on plate.

ALBA,D.R., **Influência dos parâmetros sobre a geometria de cordões produzidos por soldagem MAG Robotizado**. 2012. 28f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

In order to analyze possible gains in productivity and quality on welding using robotics, this study sought by analyzing the geometry of the weld bead, verify about the influence of the welding speed in the MAG process. Thus, the MAG robotic welding was performed on plates as bead-on plate. The weld metal was a low carbon steel (SAE 1008) and the electrode was classified as AWS ER70S-6. Were employed various combinations of welding parameters (current, voltage, welding speed) and as shielding gas was used a mixture of 90% Ar + 10% CO₂. The results show that a high welding speed influences on the characteristics of the weld beads. It was seen that for large speeds the dimensions of penetration and reinforcement are affected. In contrast high speeds decrease the time of welding arc open which allows the cost reduction of the weld.

KEYWORDS: MIG/MAG, Robotic Welding, Welding speed, Welding energy, bead-on plate.

LISTA DE SIMBOLOS

A_d	Área depositada	mm ²
Ar	Argônio	
A_p	Área de penetração	mm ²
CO_2	Dióxido de carbono	
CP	Corpo de prova	
E	Energia de soldagem	J/mm
h	Altura do reforço	mm
I	Corrente	A
$LS\&TC$	Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas	
MAG	Metal Active Gas	
MIG	Metal Inert Gas	
MT	Modo de transferência	
O_2	Oxigênio	
P	Penetração	mm
TIG	Tungsten Inert Gas	
U	Tensão	V
v	Velocidade de soldagem	mm/s
v_a	Velocidade de alimentação do arame	m/min
W	Largura	mm
ZAC	Zona afetada pelo calor	
η	Rendimento térmico	%

INDICE

	Pág.
1	INTRODUÇÃO.....1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....2
2.1	Processo de Soldagem MIG/MAG2
2.2	Gás de Proteção3
2.2.1	Argônio (Ar)3
2.2.2	Oxigênio (O ₂).....3
2.2.3	CO ₂ (Dióxido de carbono)3
2.2.4	Argônio + Dióxido de Carbono (Ar + CO ₂)4
2.3	Variáveis do processo de soldagem MIG/MAG4
2.3.1	Tensão de soldagem.....4
2.3.2	Corrente de soldagem.....4
2.3.3	Velocidade de soldagem5
2.3.4	Energia de soldagem5
2.4	Descontinuidades em juntas soldadas.....5
2.4.1	Porosidade5
2.4.2	Mordedura.....5
2.4.3	Fusão Incompleta.....6
2.4.4	Penetração incompleta na junta.....6
2.4.5	Trincas6
2.5	Soldagem Robotizada.....6
2.5.1	Soldagem automática6
2.5.2	Componentes de um sistema para soldagem a arco robotizado7
3	METODOLOGIA8
3.1	Materiais e métodos para soldagem8
3.2	Materiais e métodos para caracterização das soldas9
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES10
4.1	Geometria dos cordões de solda10
4.2	Análise de descontinuidades12
4.3	Custos relacionados à soldagem13
5	CONCLUSÃO15
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS15
7	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....15
A.	APÊNDICE.....16
ANEXO 117

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 2.1: PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO E EQUIPAMENTOS NO PROCESSO MIG/MAG.....	2
FIGURA 2.2: PERFIL DO CORDÃO E PENETRAÇÃO UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE GÁS EM SOLDAGEM MIG/MAG	3
FIGURA 3.1: ROBÔ MOTOMAN MA1400 E FONTE DE ALIMENTAÇÃO FRONIUS TPS4000.....	8
FIGURA 3.2: CARACTERIZAÇÃO DOS PERFIS DOS CORDÕES DE SOLDA.	10
FIGURA 4.1: GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA ANALISADOS.....	11
FIGURA 4.2: CORDÃO DE SOLDA SEM DESCONTINUIDADES APARENTES CP10.....	12
FIGURA 4.3: CORDÃO DE SOLDA APRESENTANDO POROSIDADE INTERNA CP 11.....	12
FIGURA 4.4: CORDÃO DE SOLDA APRESENTANDO MORDEDURA CP 14.	12
FIGURA 4.5: DESCONTINUIDADE PRESENTE NO CP 12	13
FIGURA 4.6: CUSTOS ENVOLVIDOS EM SOLDAGEM.	14
FIGURA A.1: MACROGRAFIAS DOS CORPOS DE PROVA.	16

INDICE DE TABELAS

	Pág.
TABELA 2.1: COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA PARA SOLDAGEM ROBOTIZADA.....	7
TABELA 3.1: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METAL BASE	8
TABELA 3.2: COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DO CONSUMÍVEL.....	9
TABELA 3.3: PARÂMETROS DE SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	9
TABELA 4.1: VALORES DIMENSIONAIS DOS CORDÕES DE SOLDA.....	11
TABELA 4.1: VALORES DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA O CALCULO DOS CUSTOS.	13
TABELA 4.2: CUSTOS ENVOLVIDOS NA SOLDAGEM.....	14

1 INTRODUÇÃO

A frequente necessidade em aumentar a produtividade, superar a escassez de mão-de-obra qualificada e superar as crescentes exigências de segurança de projeto elevaram a demanda pela automação. Desta forma, é possível superar alguns dos problemas encontrados durante a execução de projetos mecânicos, envolvendo entre eles a soldagem.

A necessidade e o uso da soldagem são realidades incontestáveis. Aliando a sua relativa simplicidade operacional ao seu baixo custo comparado a outros métodos de fabricação, a soldagem difundiu-se rapidamente no passar do último século. Atualmente a soldagem é o mais importante método para união permanente de metais e está presente nos mais diversos ramos da Engenharia, desde o segmento de baixa tecnologia, como indústria serralheira, até ramos de elevada tecnologia e complexidade, como indústria aeroespacial e petroquímica.

Com o passar dos anos os processos evoluíram e se aperfeiçoaram. Novas técnicas de soldagem foram introduzidas o que possibilitou uma melhor qualidade na união dos mais distintos materiais. Técnicas manuais como a soldagem por eletrodo revestido, e semiautomáticas como TIG e MIG/MAG são utilizadas no cotidiano devido a sua versatilidade e simplicidade. Pode-se destacar também outras técnicas já difundidas como Arco Submerso, Soldagem por Resistência, Soldagem por Fricção.

A técnica MIG/MAG refere-se estritamente ao processo GMAW (Gas Metal Arc Welding), sendo que o termo MIG utiliza gases inertes de proteção e MAG utiliza gases ativos que interferem diretamente na qualidade da solda. Ambos os processos são facilmente automatizáveis devido a suas características. Dentre o grupo da soldagem automática, a soldagem robótica representa uma grande parte nos processos industriais envolvendo grandes lotes. Robôs articulados podem simular movimentos e ações de um ser humano na soldagem, e com certos limites, provem uma alternativa aceitável para substituir o homem em tarefas monótonas e fatigantes. Um robô pode ser uma solução efetiva economicamente para trabalhos de soldagem a arco elétrico.

Segundo ALVES, 2009 outra busca de importante caráter nos processos de soldagem é a qualidade. É necessário analisar os critérios de aceitação e os requisitos para garantir a qualidade desejável de solda e a integridade mecânica da junta. Considerar as discontinuidades das juntas é de fato importante para a análise do processo empregado.

O presente trabalho teve objetivo de fazer um comparativo entre parâmetros na soldagem robotizada utilizando o processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding), empregada mais especificamente o processo MAG (Metal Active Gas). Uma metodologia baseada em análises macrográficas foi a base para a análise de corpos de provas soldados. O comparativo foi feito explorando principalmente a variação do parâmetro velocidade de soldagem mantendo a energia de soldagem numa faixa aceitável de valores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processo de Soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG caracteriza-se pela abertura e manutenção do arco elétrico entre o metal de adição, que é alimentado continuamente, e o metal base. Devido ao fato de o eletrodo não apresentar revestimento, fica a cargo da proteção gasosa, com pressão e vazão adequada, a função de proteger a poça de fusão contra a atmosfera vizinha. Tal proteção também auxilia na formação e manutenção do arco elétrico [ALVES, 2009; TEIXEIRA, 2011].

São notáveis e já consolidadas as vantagens que o processo MIG/MAG propicia tanto na soldagem semiautomática, como no processo automático e muito empregado na soldagem robotizada produzindo soldas de alta qualidade e repetibilidade.

A diferenciação entre o processo MIG e o MAG se dá principalmente nos gases de proteção utilizados. No processo MIG, o gás de proteção é inerte (Ar ou He), isto é, não reage metalurgicamente com a poça de fusão. Seu trabalho é proteger tais regiões também auxiliando na formação e manutenção do arco [WAINER, 1977; MACHADO, 1996; ALVES, 2009].

Segundo Machado, 1996 o processo MAG geralmente utiliza uma mistura binária (Ar + CO₂) ou até mesmo ternária (Ar + CO₂ + O₂) que além de possuir vantagens citadas anteriormente também tem caráter oxidante, reagindo metalurgicamente com a gota e poça de fusão.

É possível visualizar na Figura 2.1 uma esquematização do processo MIG/MAG.

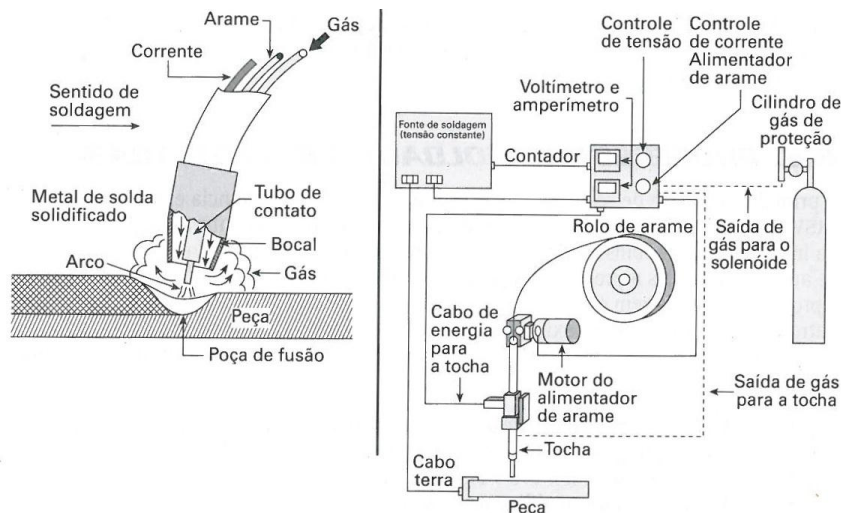


Figura 2.1: Princípio de funcionamento e equipamentos no processo MIG/MAG [ROMANO; 2002].

O processo de soldagem MIG/MAG proporciona muitas vantagens na soldagem manual e automática para aplicações de alta e baixa produção comparado a outros processos como eletrodo revestido, arco submerso e TIG. Abaixo são citadas algumas vantagens do processo [ALVES, 2009].

- Possibilidade de soldar em todas posições e também de adaptação a automação;
- Alta taxa de deposição devido à elevada densidade de corrente possível;
- Ampla faixa de aplicação em diferentes ligas e espessuras;
- Possibilidade de soldar em elevadas velocidades de soldagem comparada a outros métodos;
- Alimentação contínua do eletrodo nu, não formação de escória.

Entre as desvantagens do processo têm-se [ALVES, 2009]:

- Alta velocidade de resfriamento (ausência de escória), o que pode gerar trincas;
- Maior custo inicial de equipamento;
- Problemas de operação em locais de difícil acesso e em ambientes com forte ventilação;
- Grande emissão de raios ultravioleta e produção de ozônio dependendo da faixa corrente utilizada.

2.2 Gás de Proteção

Em processos de soldagem o gás de proteção utilizado influencia diretamente no desempenho e qualidade da operação como é possível ver na Figura 2.2. Como função primária, deseja-se que o gás proteja a poça de fusão do contato com a atmosfera, evitando desta forma a geração de óxidos ou nitretos por exemplo. Tal contaminação pode resultar em baixa resistência, baixa ductilidade, descontinuidades nas juntas, entre outros. O gás de proteção também é responsável pela abertura e estabilidade do arco elétrico. Outra influência que pode ser citada consiste na transferência do metal de solda durante o processo. [ALVES, 2009; MACHADO, 1996; ESAB, 2004]

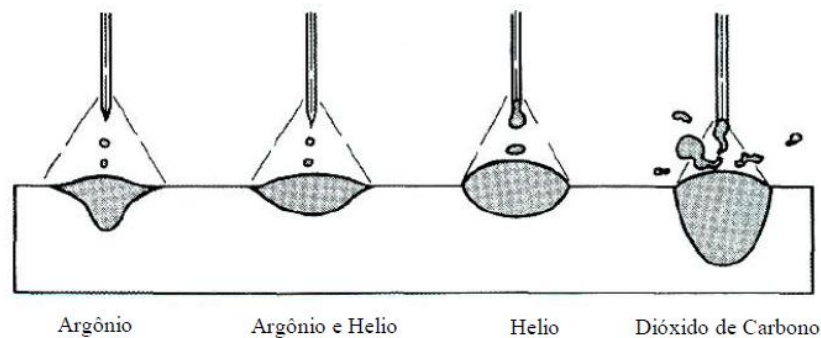


Figura 2.2: Perfil do cordão e penetração utilizando diferentes tipos de gás em soldagem MIG/MAG [ALVES, 2009].

Alguns gases de proteção utilizados no processo MIG/MAG, e suas características, estão citados a seguir.

2.2.1 Argônio (Ar)

O Argônio é um gás inerte que pode ser utilizado puro como também em combinação com outros gases procurando características de arco desejadas. Segundo ESAB, 2004 o argônio propicia excelente estabilidade de arco, boa penetração e ótimos perfis de cordão de solda.

2.2.2 Oxigênio (O₂)

Segundo Machado, 1996 a adição de O₂ no argônio melhora a estabilidade do arco na soldagem dos materiais ferrosos. A incidência de mordedura diminui com o emprego do gás. Também provoca aumento de penetração em quantidades corretas, em contrapartida diminui a taxa de fusão do arame.

2.2.3 CO₂ (Dióxido de carbono)

Segundo Alves, 2009 e Machado, 1996 o dióxido de carbono é um gás ativo e produz efeito oxidante nos processos de soldagem. Com sua utilização soldas integras podem ser

consistentemente obtidas sem a presença de porosidade ou outras descontinuidades. Sua utilização é muito difundida na soldagem de aços.

As vantagens do uso do CO₂ comparado a outros gases de proteção são velocidades de soldagem maiores e penetração profunda. Como inconvenientes pode-se citar os altos níveis de salpico da solda.

ESAB, 2004 diz que de um modo geral, boas propriedades mecânicas podem ser obtidas. Frequentemente mistura-se dióxido de carbono ao argônio para balancear as características dos dois gases.

2.2.4 Argônio + Dióxido de Carbono (Ar + CO₂)

Segundo ESAB, 2004 misturas de Ar + CO₂ são utilizadas principalmente em aços carbono e baixa liga, e com limitações, em soldagem de aços inoxidáveis. Como o CO₂ puro produz grandes níveis de respingo, a adição de argônio procura a diminuição de tais níveis. É alcançada melhor penetração com menor porosidade quando se utiliza CO₂ no lugar de O₂. Com misturas de 5% a 10% de CO₂ tem-se um arco forte e definido, possibilitando desta forma um controle muito mais fácil da poça de fusão.

2.3 Variáveis do processo de soldagem MIG/MAG

A correta seleção e utilização dos parâmetros envolvidos na soldagem MIG/MAG dependerá do perfeito conhecimento de como tais variáveis influenciam as características do cordão de solda. Por serem fatores que variam em faixas de utilização muito abrangentes são considerados os ajustes primários em qualquer processo de soldagem. Estes ajustes afetam marcadamente a qualidade do cordão. Abaixo são descritas as principais variáveis em processos de soldagem MIG/MAG.

2.3.1 Tensão de soldagem

A influência da tensão se dá principalmente na largura do cordão de solda. Cordões de solda largos são alcançados com tensões altas. Também afeta em menor proporção a penetração e modo de transferência do metal de solda. De uma forma geral, tensões baixas geram cordões estreitos e com maior penetração, sendo que o oposto é válido para tensões altas.

A seleção da tensão de soldagem deve estar diretamente ligada à corrente de soldagem para que haja estabilidade do arco. Defeitos como porosidade, salpico e mordedura podem ser encontrados caso estes parâmetros não estejam coerentes. [MACHADO, 1996; ESAB, 2004; ALVES, 2009]

2.3.2 Corrente de soldagem

A corrente de soldagem tem influência direta sobre a taxa de deposição, modo de transferência, penetração e reforço do cordão de solda.

De acordo com ESAB, 2004, no processo MIG/MAG a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame. Quando a velocidade de alimentação é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido.

O aumento da quantidade de corrente implica diretamente na taxa de deposição do metal de solda. Desta forma mais metal e calor são aplicados a solda resultando em maior penetração e aumento no tamanho dos cordões de solda, sendo que o oposto também se aplica [MACHADO, 1996; ALVES, 2009].

2.3.3 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é a relação entre o caminho percorrido pelo arco elétrico e o tempo gasto para percorrê-lo. Este parâmetro exerce influência na taxa de deposição bem como na geometria do cordão de solda. Além disso é direta a influência deste parâmetro na produtividade.

Em resumo, o aumento deste parâmetro, mantendo todos outros constantes, gera as seguintes consequências [MACHADO, 1996; ALVES, 2009].

- Diminuição das dimensões gerais do cordão;
- ZAC mais estreita;
- Maior refino de grão do metal de solda;
- A penetração decresce;
- Devido a insuficiente deposição pode ocorrer mordedura.

2.3.4 Energia de soldagem

A energia de soldagem é a energia imposta ao processo por unidade de comprimento que o arco percorre. Sua unidade é expressa em Joules por milímetro [MACHADO, 1996; ALVES, 2009].

A Equação 2.1 descreve a energia de soldagem.

$$E = \eta \frac{UI}{v} \quad (2.1)$$

Onde E= energia de soldagem (J/mm), U= tensão de soldagem (V), I= corrente de soldagem (A), v= velocidade de soldagem (mm/s) e η = rendimento térmico (%).

2.4 Descontinuidades em juntas soldadas

Se utilizados parâmetros coerentes e com materiais corretos é possível alcançar soldas de ótima qualidade pelo processo MIG/MAG. A maioria dos defeitos encontrados são causados por práticas de soldagem inadequadas. Defeitos usualmente encontrados incluem porosidade, mordedura, falta de fusão, falta de penetração, sobre as quais serão tratadas brevemente a seguir.

2.4.1 Porosidade

Segundo Alves, 2009 este defeito consiste em poros de gás encontrados no interior ou superfície do cordão de solda solidificado. Sua distribuição é aleatória bem como seu tamanho. Geralmente se forma enquanto o metal fundido se solidifica e pode ter como causa a falta de gás de proteção possibilitando, desta forma, a absorção de oxigênio e nitrogênio do ar atmosférico.

2.4.2 Mordedura

Mordedura pode ser descrita como um entalhe no metal base no sentido das bordas do cordão de solda. É comumente causada por parâmetros de soldagem inadequados. Já em processos totalmente mecanizados, mordeduras podem ser formadas devido à grande energia de soldagem ou devido a maior corrente de soldagem. O metal de solda escorre antes de solidificar sem ter dado formato correto ao cordão de solda [MACHADO, 1996; ESAB, 2004; ALVES, 2009].

2.4.3 Fusão Incompleta

Fusão incompleta ou falta de fusão é uma descontinuidade que ocorre onde não há fusão da superfície do metal base em contato com o metal de solda, sendo geralmente um defeito pontual no cordão de solda. Os causadores desta descontinuidade são usualmente a velocidade de soldagem e tensão do arco muito baixas. Falhas na remoção de escória bem como a presença de óxidos facilitam a presença do defeito [ESAB, 2004; ALVES, 2009].

2.4.4 Penetração incompleta na junta

Penetração incompleta é a condição na qual a penetração na junta é inferior a penetração requerida em projeto. Este defeito é prejudicial a integridade da junta frente aos esforços aplicados.

A corrente de soldagem é o parâmetro que tem maior efeito sobre a penetração. Aumentando a corrente, aumenta-se a penetração. Chanfros inadequados para a junta também geram grande influência no aparecimento do defeito [MACHADO, 1996; ESAB, 2004].

2.4.5 Trincas

Trincas podem ocorrer tanto no metal depositado como na ZAC e geralmente são longitudinais ao cordão de solda. A composição química do metal base pode levar a este defeito. A composição química do material combinado a taxas de resfriamento inadequadas produz condições de fragilidade que facilitam o aparecimento de trincas. Fatores como restrição das juntas, perfil impróprio do cordão, absorção de hidrogênio, contaminantes no material, técnicas incorretas de soldagem também facilitam o surgimento do defeito. [ESAB, 2004; ALVES, 2009]

2.5 Soldagem Robotizada

De acordo com Schnee, 1993 a soldagem robotizada oferece a uma empresa a oportunidade de ganho em competitividade enquanto melhora sua imagem frente a clientes como um fornecedor de alta qualidade e custo reduzido. Sistemas robotizados de solda aumentam a flexibilidade de resposta frente a mudanças na necessidade de produção e reduzem o retrabalho em fabricação, desta forma o tempo de entrega é diminuto.

Portanto o emprego da robótica tem o poder de incrementar a produtividade e melhorar a qualidade de uma indústria, desde que se façam ajustes a fim de que o investimento alcance de fato o resultado esperado.

2.5.1 Soldagem automática

Soldagem automática é definida como a utilização de componentes mecanizados/eletrônicos para executar as funções básicas e necessárias de um procedimento de soldagem. Para que a soldagem seja considerada automática, é necessário que as 3 etapas descritas a seguir sejam satisfeitas.

- Iniciar o arco elétrico;
- Criar movimento relativo entre a tocha e a peça;
- Regular as variáveis de soldagem como tensão, corrente, taxa de alimentação do arame, etc. para assim controlar o arco elétrico.

Segundo Romano, 2002 a soldagem robotizada é uma forma específica de soldagem automática e é definida pela AWS como soldagem feita com o equipamento (robô, manipulador, etc.) o qual executa operações de soldagem, após programação, sem ajuste ou controle por parte do operador de solda.

Primeiramente foram introduzidos robôs na indústria automobilística para soldas ponto. Em Alves, 2009 é dito que tais robôs continuam sendo amplamente utilizados mas foi no campo da soldagem GMAW e GTAW que a soldagem robotizada ganhou destaque. Muitos fatores contribuíram para a robotização sendo possível citar.

- Maior controle do processo;
- Diminuir necessidade de mão-de-obra qualificada;
- Saúde e segurança;
- Padrões de qualidade inaceitáveis em processos não robotizados;
- Incremento de produção;
- Diminuição dos custos de produção.

2.5.2 Componentes de um sistema para soldagem a arco robotizado

Em Romano, 2002 é dito que um robô industrial consiste em elos conectados possuindo uma tocha de soldagem numa extremidade controlada pelo programa inserido no robô. Vale salientar as diversas possibilidades de orientação que um robô de soldagem pode utilizar. Existe a configuração cartesiana a qual possui as três direções (eixo x, eixo y, eixo z). Este é muito empregado para soldagem de cordões lineares. Também há a configuração cilíndrica (eixo x, eixo z, 1 junta de rotação) e esférico (eixo x, 2 juntas de rotação). Finalmente, existe o robô articulado no qual todas operações são de rotação e que permite a tocha estar em qualquer posição do espaço de alcance do braço.

Os robôs de soldagem são constituídos por quatro principais elementos: robô, controle computacional, fonte de soldagem, equipamentos e acessórios para soldagem. A Tabela 2.1 abaixo mostra considerações importantes que devem ser levadas em conta na hora de escolher o robô correto para determinada aplicação.

Tabela 2.1: Componentes básicos de um sistema para soldagem robotizada [ROMANO, 2002].

Componentes básicos	Considerações
Robô	Graus de liberdade, envelope de trabalho (faixa), fonte de energia, repetibilidade, velocidade, capacidade de carga, tipo de acionadores.
Controle Computacional	Técnica de programação, sistema de feedback de controle, tamanho da memória e do arquivo de backup, armazenamento do programa, interfaces, softwares especiais de soldagem.
Fonte de energia para soldagem	Ciclo de trabalho (usualmente 100% é desejável), interface com o controle do robô, precisão (corrige pequenas flutuações da tensão do arco) e capacidade de constantemente iniciar o arco elétrico.
Equipamentos e acessórios para soldagem a arco	Tipo de alimentador, tipo de controle, interface com o controle do robô, tocha de soldagem, cabos, ferramentas para alinhamento, sensores, sistemas de segurança.

A escolha de um robô de solda está relacionada à precisão de posicionamento do robô, à sua capacidade de carga, velocidade de deslocamento e dos componentes que fornecem energia para a abertura e manutenção do arco elétrico. Robôs com 6 graus de liberdade tem se demonstrado os mais indicados para a soldagem devido à sua versatilidade.

Romano, 2002 diz que fatores como segurança e sensoriamento do robô também tem relevância no momento da escolha de um sistema robotizado.

3 METODOLOGIA

Conforme descrito anteriormente, neste trabalho foram depositados cordões de solda sobre chapas de aço ao carbono utilizando o processo de soldagem MAG robotizado.

Tomou-se como ponto de partida parâmetros utilizados por Alves, 2009 para soldagem de liga de aço ao carbono utilizando o mesmo arame e gás de proteção empregados naquele trabalho. Escolheu-se uma energia de soldagem aceitável e, nesta condição se adotou parâmetros que permitiam a máxima velocidade de soldagem sem ocorrência de defeitos.

A partir destes parâmetros, procurou-se verificar qual a máxima velocidade de soldagem que seria possível, para a energia de soldagem adotada, sem que se observassem defeitos nos cordões.

3.1 Materiais e métodos para soldagem

As soldas foram realizadas sobre chapas de aço de baixo carbono com espessura de 6,35 mm. A composição química das chapas está descrita na tabela 3.1 abaixo. Tal composição foi obtida através de espectrometria ótica.

Tabela 3.1: Composição química do metal base (%).

Aço	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
SAE 1008	0,091	0,023	0,417	0,02	0,013	0,018	0,018

Antes da realização de cada cordão de solda os corpos de prova foram submetidos a limpeza para remover resíduos de óleo e impurezas.

Todos os cordões foram realizados sob a forma de simples deposição sobre chapa (bead-on plate).

As soldas foram feitas no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC) utilizando o Robô Yaskawa Motoman, modelo MA1400 com seis graus de liberdade, equipado com tocha de soldagem MIG/MAG. A fonte de potência utilizada foi a fonte Fronius Trans Puls Synergic 4000 totalmente digital, sinérgica, curva característica tensão constante, com capacidade de soldagem curto-circuito, aerossol (spray), pulsada com saída máxima de corrente de 400 A. A Figura 3.1 são imagens dos equipamentos utilizados.



Figura 3.1: Robô Motoman MA1400 e fonte de alimentação Fronius TPS4000.

O consumível (aramado maciço, AWS ER 70S-6) com 1,2mm de diâmetro e é descrito na norma AWS A5.18, o qual possui seus dados na tabela 3.2.

O gás de proteção utilizado foi uma mistura de Ar + 10%CO₂ com uma vazão de 9 litros por minuto (l/min).

Tabela 3.2: Composição química e propriedades do consumível.

Materiais	Elemento Químico (%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
AWS ER70S-6	0,07 - 0,15	0,8 - 1,15	1,4 - 1,85	0,025	0,035	0,5
	Resistência a tração (mínima)		Limite Escoamento (mínima)		Alongamento (mínimo)	
	MPa		MPa		%	
AWS ER70S-6	480		400		22	

Após a programação do robô para realizar a trajetória estipulada foram realizados experimentos exploratórios com o objetivo de ajustar os parâmetros iniciais, permitindo obter cordões sem defeitos aparentes. As condições de soldagem foram selecionadas de modo que todos os cordões de solda possuíssem aproximadamente a mesma energia de soldagem. Variou-se principalmente os parâmetros velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame o qual influi predominantemente na corrente de soldagem. Os parâmetros foram escolhidos analisando aparência do cordão, estabilidade de arco elétrico, descontinuidades superficiais e com menor quantidade de salpico.

A tabela 3.3 ilustra os parâmetros escolhidos para a confecção dos corpos de prova.

Tabela 3.3: Parâmetros de soldagem dos corpos de prova.

CP	Tensão	v_a	Corrente	v	E
1	25	11,5	290	10	725
2	25	12	315	10	787,5
3	25	12,5	320	11	727,27
4	25,5	12,5	312	11	723,27
5	26	12,5	327	10,5	809,71
6	27	12,5	334	11,5	784,17
7	28	13	340	12,5	761,6
8	29	13	342	13	762,92
9	30	13	360	13,5	800
10	30,5	14	375	14,5	788,79
11	30,5	14	375	15	762,5
12	31	14,5	385	16	745,93
13	32	15	395	17	743,52
14	32,5	15,2	400	17,5	742,85
15	32,5	15,2	400	18	722,22

Onde v_a = velocidade de alimentação do arame (m/min), v = velocidade de soldagem (mm/s), E= energia de soldagem (J/mm).

3.2 Materiais e métodos para caracterização das soldas

Para cada corpo de prova soldado, foi realizado o exame macrográfico da seção transversal do cordão de solda através do processo de corte e lixamento das superfícies utilizando os seguintes equipamentos.

- Máquina de corte Cut-off;
- Disco de corte especificação AA3;
- Lixas de granulometria 80, 100, 180, 220, 320, 400, 600;

As macrografias foram feitas com nital 10% para a revelação dos perfis dos cordões de solda. Na análise dos perfis dos cordões de solda foi usado o software ImageJ no qual foram obtidas todas as medidas do cordão de solda.

Cordões foram caracterizados através da medida de penetração, reforço e largura de cordão, área de penetração e área depositada conforme Figura 3.2.

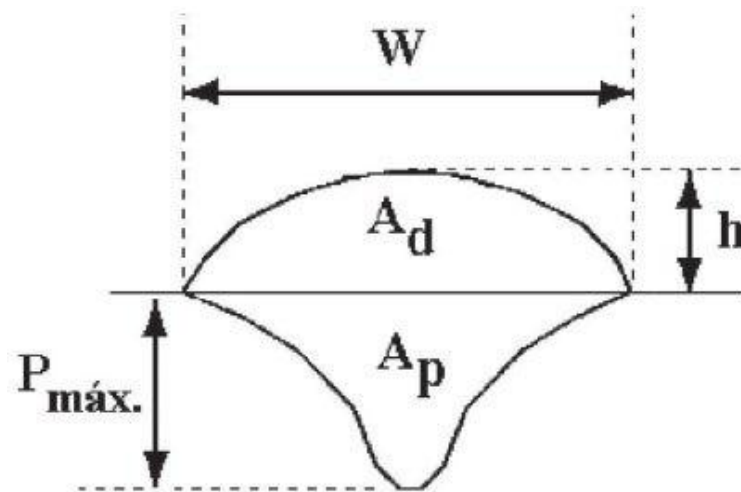


Figura 3.2: Caracterização dos perfis dos cordões de solda.

Onde P = penetração (mm), h = reforço (mm), W = largura (mm), A_d = área depositada (mm^2), A_p = Área de penetração (mm^2).

Amostras foram retiradas dos corpos de prova, e por meio de macrografias os dados dimensionais julgados pertinentes foram extraídos. Também buscou-se encontrar discontinuidades nas soldas.

Por fim, uma breve análise de custos de soldagem foi realizada para comparar os parâmetros utilizados em relação ao custo por metro de solda.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no trabalho são apresentados neste capítulo, bem como a discussão pertinente dos mesmos. A geometria do cordão de solda foi o resultado cuja análise caracterizou as soldas obtidas.

4.1 Geometria dos cordões de solda

Os parâmetros geométricos obtidos da análise macrográfica dos cordões de solda e tratamento de imagem foram os valores de dimensão da largura, penetração, reforço, área depositada e área de reforço, que podem ser observados na tabela 4.1. Estes valores foram obtidos considerando os diferentes parâmetros utilizados citados anteriormente na tabela 3.3.

Tabela 4.1: Valores dimensionais dos cordões de solda.

CP	W	h	P	A _d	A _p
1	8,128	3,923	4,985	21,055	22,970
2	8,043	4,064	5,405	22,829	24,248
3	7,260	4,276	5,475	24,414	19,628
4	7,676	3,993	4,981	22,170	22,469
5	8,650	4,247	5,094	19,492	26,751
6	7,133	3,874	5,715	21,633	21,963
7	6,900	4,170	5,736	21,339	21,538
8	8,784	5,207	4,911	19,468	30,513
9	9,292	3,196	5,059	22,866	18,654
10	9,229	3,366	5,270	23,749	18,342
11	8,805	3,471	4,487	21,113	19,290
12	8,742	3,260	4,868	22,919	17,955
13	9,144	3,514	4,149	20,560	19,826
14	9,835	2,992	4,360	22,399	17,163
15	8,253	3,062	4,628	21,260	15,630

Onde W= largura (mm), P= penetração (mm), h= reforço (mm), A_d= área depositada (mm²), A_p= Área de penetração (mm²).

A Figura 4.1 ilustra os dimensionais encontrados após análise dos corpos de prova.

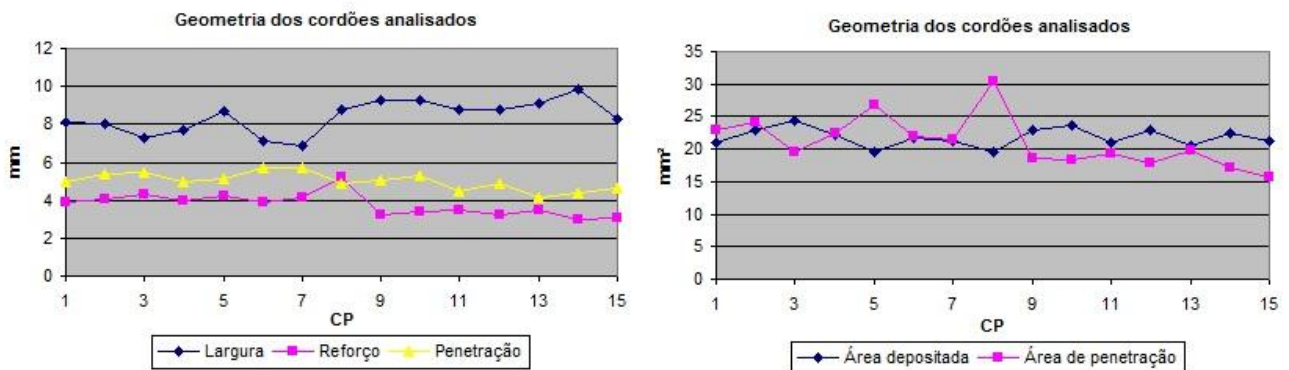


Figura 4.1: Geometria dos cordões de solda analisados.

A energia de soldagem depende dos parâmetros elétricos tensão e corrente e também do parâmetro velocidade de soldagem aliado ao rendimento térmico do processo.

Neste trabalho exploraram-se velocidades de soldagem bastantes elevados comparadas aos métodos hoje empregados. O aumento de 10 mm/s até 18 mm/s foi fator de grande influência nos parâmetros geométricos da solda. Na maioria dos cordões de solda foi constatado um reforço excessivo mostrando que houve pouco tempo de exposição ao arco elétrico, o que não permitiu que mais material do metal base se fundisse.

A penetração também foi afetada pelo acréscimo da velocidade de soldagem. Mesmo alcançando altas correntes foi visto que a penetração e área de penetração decrescem com o aumento da velocidade de soldagem. Mesmo tendo uma penetração aceitável para os parâmetros impostos, novamente a menor exposição do metal base ao arco elétrico não permitiu que o arame se fundisse de forma completa e satisfatória. Em compensação, pequenos ganhos de largura foram vistos aumentando a velocidade de soldagem.

Outro fator importante neste trabalho foi a energia de soldagem. A impossibilidade de controlar totalmente este parâmetro gerou diferenças nos cordões de solda efetuados, Somente sendo possível controlar a velocidade de alimentação do arame, a corrente não teve seus valores fixos o que não permitiu tornar a energia de soldagem um valor constante para os testes. Altos valores de energia de soldagem, aliados a baixa velocidade de soldagem propiciam uma maior penetração do metal de solda sendo que o inverso também pode ser visto nas análises.

A figura 4.2 mostra um cordão de solda o qual não apresentou defeitos aparentes em suas macrografias.



Figura 4.2: Cordão de solda sem discontinuidades aparentes CP10.

4.2 Análise de discontinuidades

O processamento digital dos corpos de prova também permitiu a análise das discontinuidades presentes. Na figura 4.3 e figura 4.4 é possível constatar discontinuidades como porosidade e mordedura, respectivamente.

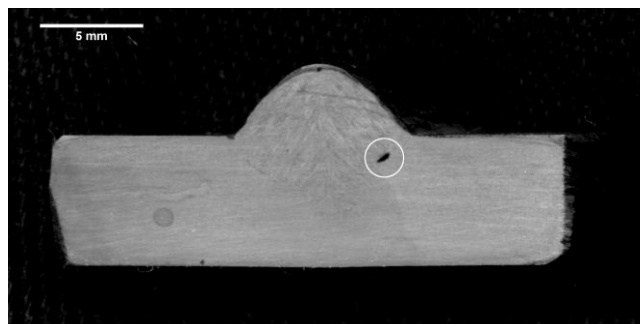


Figura 4.3: Cordão de solda apresentando porosidade interna CP 11.

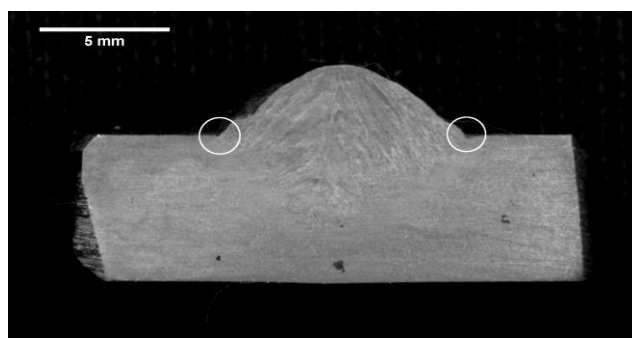


Figura 4.4: Cordão de solda apresentando mordedura CP 14.

A respeito das porosidades, tais discontinuidades podem ser atribuídas às altas velocidades de soldagem aliadas a vazão insuficiente de gás de proteção provocando

solidificação antes da liberação dos gases ou pela absorção de oxigênio ou nitrogênio do ar atmosférico.

A mordedura tem como provável causa as excessivas correntes de soldagem aplicadas em alguns cordões de solda.

Também foi constatado no CP 12 uma descontinuidade que pode ter sido provocado pelas altas velocidades de soldagem que geram um gradiente de temperaturas bastante elevado na peça. A Figura 4.5 ilustra tal defeito.

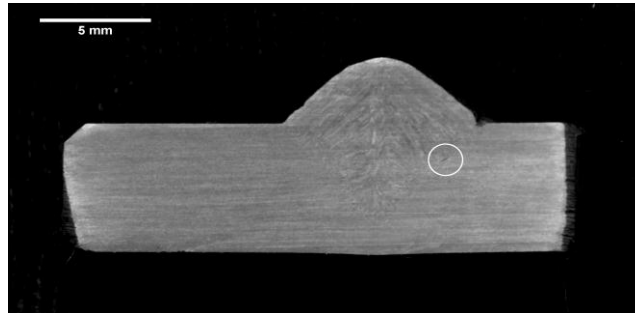


Figura 4.5: Descontinuidade presente no CP 12.

A visualização de todas as macrografias efetuadas está contida no Apêndice A do presente trabalho.

4.3 Custos relacionados à soldagem

Em Modenesi et al., 2005 o autor sugere que em operações de soldagem há um grande número de aspectos que influem no custo final da operação. Visando comparar procedimentos de soldagem e quantidade de consumíveis utilizados foi proposto um modelo o qual pode estimar os custos envolvidos nos processos de soldagem.

Algumas considerações foram realizadas para a análise de custos e podem ser vistas na tabela 4.1. Tais valores foram retirados da literatura e contato com fornecedores dos materiais empregados na soldagem. É possível ver no Anexo 1 a metodologia utilizada para a estimativa de custos, baseada em Modenesi et al., 2005.

Tabela 4.1: Valores das variáveis utilizadas para o cálculo dos custos.

A_s	0,01629
ρ	7,8
ω	90
ω_{el}	100
C_{eu}	5,7
C_{elU}	0,486
C_{gU}	0,017

Onde A_s = Área da seção transversal do arame (m^2), ρ = densidade (g/cm^3), ω = rendimento do processo (%), ω_{el} = rendimento dos equipamentos elétrico (%), C_{eu} = Custo do eletrodo (R\$/kg), C_{elU} = custo da energia elétrica (R\$/kW), C_{gU} = custo do gás de proteção (R\$/litro).

No presente trabalho somente serão analisados os custos de consumíveis e de energia para efetuar um metro de cordão solda (R\$/m).

Tabela 4.2: Custos envolvidos na soldagem.

CP	C_e	C_g	C_{en}	C_t
1	1,541949	0,25500	0,097	1,894824
2	1,609047	0,25500	0,106	1,970359
3	1,523719	0,23181	0,098	1,853719
4	1,523284	0,23181	0,097	1,852744
5	1,596255	0,24285	0,109	1,948423
6	1,457394	0,22173	0,105	1,784997
7	1,394480	0,20400	0,102	1,701296
8	1,340819	0,19615	0,102	1,639967
9	1,291179	0,18889	0,108	1,588068
10	1,288846	0,17585	0,106	1,571196
11	1,251436	0,17000	0,102	1,524374
12	1,215152	0,15938	0,100	1,475229
13	1,183052	0,14999	0,100	1,433428
14	1,164644	0,14571	0,100	1,410644
15	1,132286	0,14166	0,097	1,371453

Onde C_e = custos com eletrodo (R\$/m), C_g = custo com gás de proteção (R\$/l), C_{en} = custos com energia (R\$/kw), C_t = custo total (R\$/m).

A Figura 4.6 mostra o comportamento dos custos de soldagem.

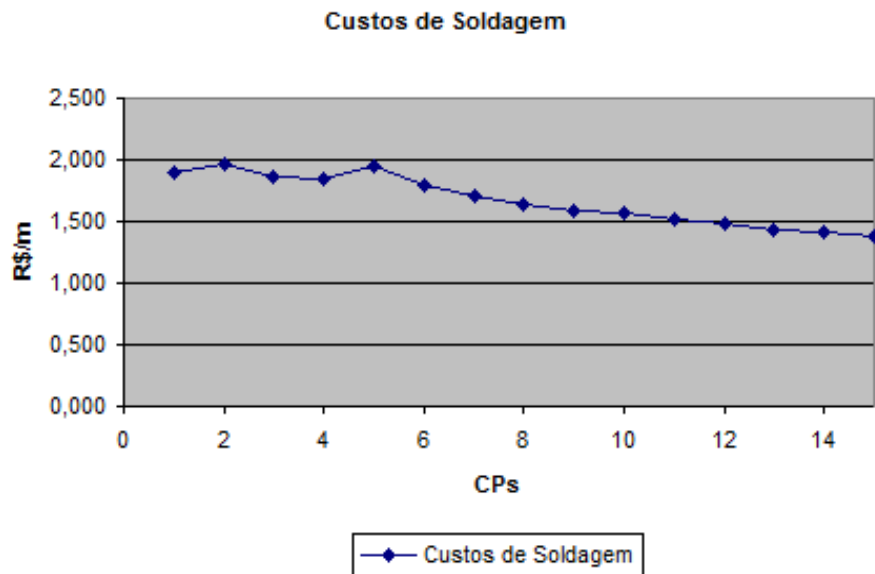


Figura 4.6: Custos envolvidos em soldagem.

Fica evidente que com o aumento da velocidade de soldagem o tempo de arco elétrico aberto é diminuído fazendo desta forma o consumo de gás de proteção e custos com energia decaírem, mostrando assim que altas velocidades de soldagem, desde que a qualidade da solda seja mantida, é uma ótima forma de diminuir custos nos processos de soldagem.

5 CONCLUSÃO

Após a soldagem dos corpos de prova utilizando diferentes parâmetros de soldagem, mas variando principalmente velocidade de soldagem, foi possível através de macrografias analisar parâmetros aceitáveis para o processo MAG. Foi visto que o aumento excessivo da velocidade de soldagem influi principalmente nas dimensões do reforço e penetração do cordão.

A robotização de um processo produtivo possui vários benefícios, podendo citar aumento de produtividade, redução de custos de mão-de-obra, aumento de qualidade e maior grau de segurança. Os ganhos de velocidade e a diminuição dos custos são notáveis porem antes de a decisão ser tomada sobre a automatização diversos fatores devem ser previamente analisados.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo sugere-se os seguintes aspectos:

- Desenvolver o estudo em juntas de filete;
- Analisar a influência do gás de proteção bem como a variação de sua vazão;
- Analisar a influência de fatores como distância do eletrodo e ângulo de tocha;
- Desenvolver o estudo com o parâmetro energia de soldagem constante;
- Programar novas trajetórias de soldagem no robô.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alves, V. J.; **“Desenvolvimento de Envelopes Operacionais para processo MIG/MAG com diferentes gases de proteção”**, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 172 p, 2009.

ESAB BR, **“Metalurgia da Soldagem”**, Apostila, ESAB, 2004.

Machado, I. G.; **“Soldagem e Técnicas Conexas: Processos”**, editado pelo autor, 1ª edição, 1996.

Modenesi, P. J., Marques P. V., Bracarense A. Q., **“Soldagem – Fundamentos e Tecnologia”**, Editora UFMG, 1ª edição, 2005.

Romano, V. F.; **“Robótica Industrial – Aplicação na indústria de manufatura e processos”**, Edgard Blücher, 1ª ed., 2002.

Schnee, M.; **“What to know before choosing a robotic welding system”**, Vol 72, p 49 – 51, Welding Journal, Miami, 1996.

Teixeira, G. S.; **“Análise da influência dos Parâmetros de Soldagem sobre a geometria do Cordão de Solda depositado pelo processo de Soldagem TIG-MAG em tandem”**, Dissertação (Mestrado), Univesidade Federal do Rio Grande do Sul, 122 p, 2011.

Wainer, E.; **“Soldagem”**, ABM, 11ª ed., 1977

A. APÊNDICE

Abaixo, na figura A.1 são mostrados os corpos de prova utilizados para a caracterização das soldas neste trabalho.

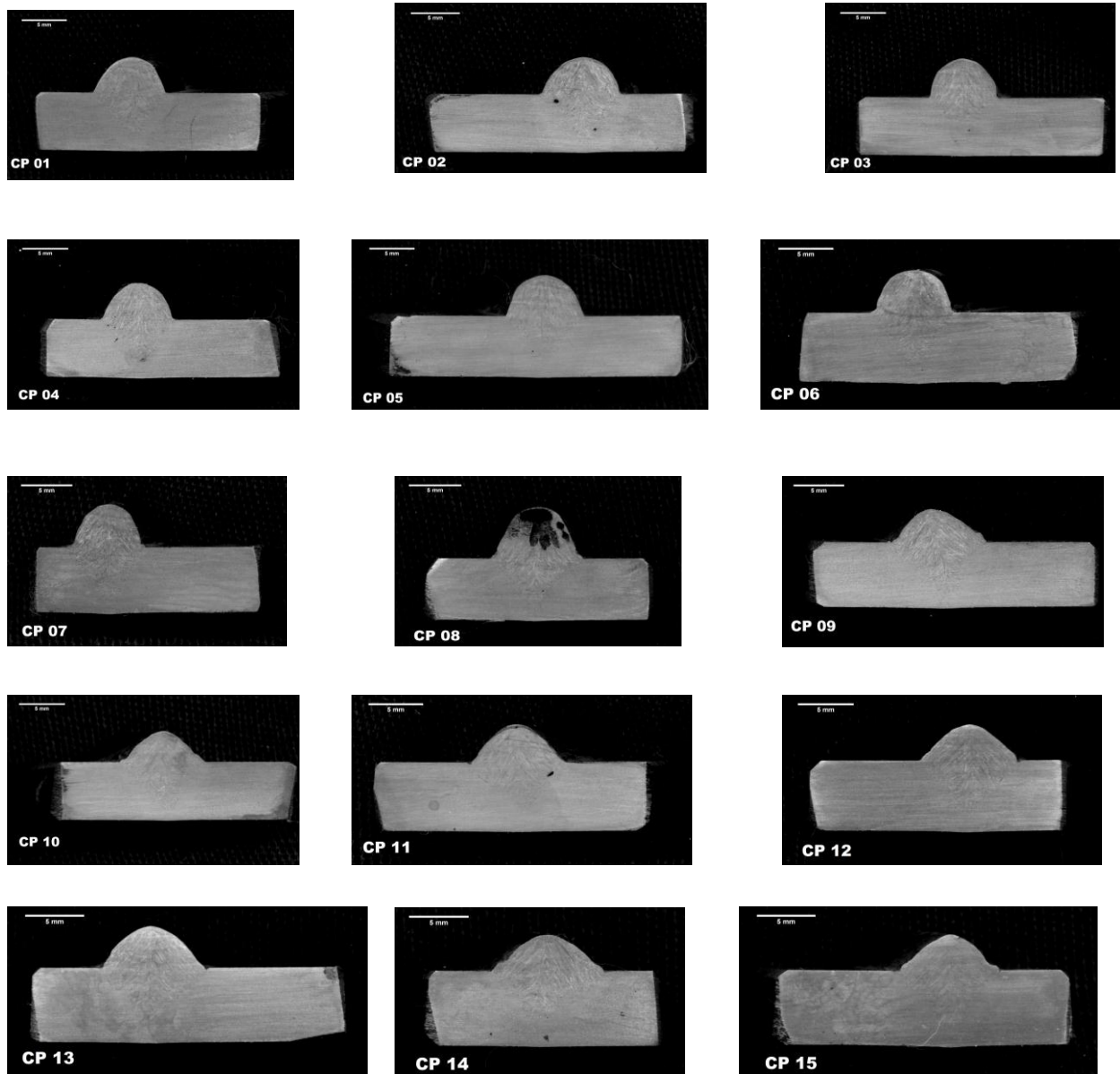


Figura A.1: Macrografias dos corpos de prova.

ANEXO 1

Em Modenesi et al., 2005 é proposto uma metodologia para a estimativa de custos em soldagem. Abaixo é descrito as equações utilizadas neste trabalho para a estimativa de tais custos.

- Custo Total

$$C_t = C_{MO} + C_C + C_E + C_M + C_D + C_{MC} \quad (A.1)$$

Onde C_t = custo total, C_{MO} = custo de mão-de-obra, C_C = custo com consumíveis, C_E = custo de energia elétrica, C_M = custo de manutenção, C_D = custo de depreciação, C_{MC} = custo com outros materiais.

- Cálculo da massa de metal depositado

$$m_s = A_s L \rho \quad (A.2)$$

Onde m_s = massa de metal de solda (Kg), A_s = área transversal do cordão (m^2), L = comprimento do cordão de solda (cm), ρ = densidade do metal de adição (g/cm^3).

- Cálculo do tempo de soldagem (tempo de arco aberto)

$$t_{ARC} = L/v \quad (A.3)$$

Onde t_{arc} = tempo de arco elétrico aberto (min), v = velocidade de soldagem (mm/min).

- Custos com eletrodo

$$C_e = \frac{m_s}{\phi} C_{eU} \quad (A.4)$$

Onde C_e = custo com eletrodo (R\$), m_s = massa de metal de solda (Kg), ϕ = eficiência de deposição (%), C_{eU} = preço do eletrodo (R\$/Kg).

- Custos com gás de proteção

$$C_g = V_g t_{ARC} C_{GU} \quad (A.5)$$

Onde C_g = custos com gás de proteção (R\$), V_g = vazão de gás utilizada (l/min), t_{arc} = tempo de arco elétrico aberto (min), C_{GU} = preço do gás (R\$/l)

- Custos com energia elétrica

$$C_{el} = \frac{P t_{ARC}}{\phi_{el}} (C_{eU}) \quad (A.6)$$

Onde C_{el} = custos com energia elétrica, P = Potência (Kw), t_{arc} = tempo de arco aberto (min), η_{el} = eficiência do equipamento elétrico (%), C_{elU} = preço da energia elétrica (R\$/Kwh).

A potência pode ser obtida multiplicando a corrente pela tensão utilizadas no processo de soldagem.