



**Marcos Vinicius Dorfschmidt**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES  
DIÂMETROS DE ARAME MACIÇO NO PROCESSO MAG  
ROBOTIZADO COM SIMPLES DEPOSIÇÃO SOBRE CHAPA**

**Horizontina**

**2015**

**Marcos Vinicius Dorfschmidt**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES  
DIÂMETROS DE ARAME MACIÇO NO PROCESSO MAG  
ROBOTIZADO COM SIMPLES DEPOSIÇÃO SOBRE CHAPA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Valtair de Jesus Alves, Mestre.

**Horizontina**

**2015**

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:**

**“Estudo comparativo entre diferentes diâmetros de arame maciço no processo  
MAG robotizado com simples deposição sobre chapa”**

**Elaborada por:**

**Marcos Vinicius Dorfschmidt**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 03/12/2015  
Pela Comissão Examinadora**

---

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Prof. Me. Anderson Dal Molin  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

---

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina  
2015**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado e me ensinaram a buscar através da educação a oportunidade de alcançar nossos sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à DEUS, pela força recebida durante toda esta caminhada. À toda minha família, em especial ao meu pai Neldo Dorfschmidt, à minha mãe Clair e ao meu irmão Luciano Eduardo, pelo apoio e incentivo durante todos os momentos desta jornada, pois sem vocês nada seria possível. Agradeço também à minha amada companheira e namorada Pamela Hanauer, por estar sempre ao meu lado. À metalúrgica NETZ e toda sua equipe, pela disponibilização de toda estrutura necessária para a realização dos testes práticos. Ao professor Valtair de Jesus Alves, pelo apoio e orientação no planejamento e execução deste trabalho.

*“A melhor maneira de nos prepararmos para o futuro é concentrar toda a imaginação e entusiasmo na execução perfeita do trabalho de hoje.”*

*Dale Carnegie*

## RESUMO

Dentre os diversos processos de soldagem existentes, o processo GMAW é um dos mais utilizados, podendo ser facilmente encontrado tanto nas pequenas como nas grandes indústrias. Isto se deve ao fato de que este processo possibilita a obtenção de altas taxas de deposição, é de fácil operação e possui conveniência para automação, contudo, assim como qualquer processo de soldagem, este possui diversos parâmetros que devem ser corretamente ajustados. O diâmetro do arame utilizado como metal de adição neste processo é um fator que está diretamente relacionado à rentabilidade da operação, pois exerce influência sobre a produtividade, qualidade e também sobre o custo. Assim, o principal objetivo deste trabalho foi efetuar um estudo comparativo entre três diferentes diâmetros de arame maciço aplicados na soldagem de um determinado cordão, através do processo MAG pulsado robotizado, a fim de verificar a influência deste fator sobre as taxas de diluição e deposição, bem como o seu impacto no custo com gás de proteção, arame e energia elétrica. Para isto, foram elaborados projetos de experimentos para cada diâmetro de arame, utilizando três níveis para os fatores de corrente, tensão e velocidade de soldagem, e com a aplicação da metodologia Taguchi, foi possível identificar os níveis para cada diâmetro de arame que minimizassem a variação das respostas em relação a geometria do cordão desejada. Nos experimentos foram efetuados cordões de solda na forma de simples deposição, sobre chapas de aço carbono ASTM A36, utilizando o arame maciço ER70S-6 com diâmetros de 1,0 mm, 1,2 mm e 1,32 mm, e os resultados obtidos mostraram que com a utilização de maiores diâmetros foram necessárias energias de soldagem mais elevadas para depositar o mesmo cordão, o que resultou em melhores taxas de diluição, contudo com um custo mais elevado em energia elétrica. Também foi possível verificar que a aplicação do arame maciço com diâmetro de 1,32 mm possibilitou o emprego de maiores velocidades de soldagem para a obtenção do mesmo cordão de solda, elevando assim a taxa de deposição em 24,3% se comparada com os resultados obtidos para o arame de menor diâmetro, resultando assim em menores custos com gás de proteção.

**Palavras-chaves:** Soldagem MAG robotizada – Diâmetro do arame - Taguchi

## **ABSTRACT**

Among the various welding processes, the GMAW process is the most widely used and it can be easily found in small and large industries. This is fact is due that it allows obtaining high deposition rates, it is easy to operate and has suitability for automation, however, as any welding process, it has several parameters that must be properly adjusted. The diameter of the wire used as filler metal in this process is a factor that is directly related to the profitability of the operation because it influences on productivity, quality and cost. Thus, the main objective of this work was to make a comparative study of three different solid wire diameters applied in the welding of a particular weld bead geometry, through MAG pulsed robotic process, in order to verify the influence of this factor on the dilution and deposition rates as well its impact on the cost with shielding gas, wire and electricity. For this, experimental projects were developed for each wire diameter, using three levels for the factors of current, voltage and welding speed, and with the application of the Taguchi method, it was possible to identify the levels for each wire diameter that minimized the variation of responses to the specified geometry. Weld beads were made on the experiments, in the way of simple deposition on ASTM A36 carbon steel sheets by using the solid wire ER70S-6 with diameters of 1.0 mm, 1.2 mm and 1.32 mm, and the results showed that using larger diameters required higher welding energies to deposit the same weld bead, which resulted in better dilution rates, but with a higher cost with electricity. It was also observed that with the application of the solid wire with 1,32 mm of diameter, it was possible to use higher welding speeds to achieve the same weld bead, increasing the deposition rate on 24.3% compared with the results obtained using the smaller wire diameter, thereby resulting in lower costs with protective gas.

**Keywords:** Robotized MAG welding - Wire diameter — Taguchi

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquemática do processo GMAW .....	15
Figura 2: Equipamentos básicos para soldagem GMAW convencional .....	16
Figura 3: Modo de transferência de metal por curto circuito .....	19
Figura 4: Modo de transferência globular .....	20
Figura 5: Modo de transferência por spray .....	21
Figura 6: Representação do processo GMAW pulsado .....	23
Figura 7: Classificação dos arames .....	26
Figura 8: Taxa de fusão em função da corrente para diferentes diâmetros de arame .....	27
Figura 9: Distância entre o bico de contato e a peça.....	28
Figura 10: Ângulo relativo ao comprimento do cordão e técnica operatória.....	29
Figura 11: Ângulo relativo a chapa.....	29
Figura 12: Perfil geométrico do cordão de solda em uma junta de topo. ....	30
Figura 13: Robô de soldagem All – B4 e fonte de potência DP400 .....	37
Figura 14: Cordão depositado sobre o corpo de prova fixo no dispositivo.....	37
Figura 15: Razão S/R para o arame de diâmetro 1,0 mm .....	44
Figura 16: Corpo de prova otimizado para arame 1,0 mm.....	45
Figura 17: Razão S/R para o arame de diâmetro 1,2 mm .....	46
Figura 18: Corpo de prova otimizado para arame 1,2 mm.....	47
Figura 19: Razão S/R para o arame de diâmetro 1,32 mm.....	48
Figura 20: Corpo de prova otimizado para arame 1,32 mm.....	49
Figura 21: Variação da diluição em função da energia e do diâmetro do arame.....	50
Figura 22: Variação da taxa de deposição em função do diâmetro do arame.....	51
Figura 23: Custos de soldagem em função do diâmetro do arame .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correntes de transição para soldagem por spray .....	22
Tabela 2: Gases recomendados para soldagem de aço carbono em spray .....	24
Tabela 3: Especificações geométricas do cordão de solda para os experimentos .....	39
Tabela 4: Resultados dos projetos experimentais para o arame de 1,0 mm .....	42
Tabela 5: Análise de variância da largura do cordão efetuado com arame 1,0 mm .....	43
Tabela 6: Resultados dos projetos experimentais para o arame de 1,2 mm .....	45
Tabela 7: Análise de variância da largura do cordão efetuado com arame 1,2 mm .....	46
Tabela 8: Resultados dos projetos experimentais para o arame de 1,32 mm .....	47
Tabela 9: Análise de variância da largura do cordão efetuado com arame 1,32 mm .....	48
Tabela 10: Custos de soldagem por metro de solda com diferentes diâmetros de arame .....	51

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 Objetivo geral .....	13
1.2.2 Objetivos específicos .....	13
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW.....	15
2.2 EQUIPAMENTOS BÁSICOS.....	16
2.2.1 Fontes de potência .....	17
2.2.2 Alimentador de arame.....	17
2.2.3 Tocha de soldagem .....	17
2.3 SOLDAGEM ROBOTIZADA.....	18
2.4 MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL.....	18
2.4.1 Transferência por curto-circuito.....	19
2.4.2 Transferência globular .....	20
2.4.3 Transferência por spray ou aerosol .....	21
2.4.4 Transferência por arco pulsado.....	22
2.5 CONSUMÍVEIS .....	23
2.5.1 Gás de proteção .....	24
2.5.2 Metal de adição .....	25
2.6 PARÂMETROS DO PROCESSO E SUAS INFLUÊNCIAS.....	26
2.6.1 Tensão de soldagem .....	26
2.6.2 Velocidade de alimentação de arame .....	27
2.6.3 Extensão do eletrodo .....	27
2.6.4 Velocidade de soldagem.....	28
2.6.5 Posicionamento e deslocamento da tocha .....	29
2.7 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA .....	30
2.8 DESCONTINUIDADES NA SOLDA .....	30
2.8.1 Trincas .....	31
2.8.2 Porosidade .....	31
2.8.3 Fusão incompleta .....	31
2.8.4 Falta de penetração .....	32
2.9 ENERGIA DE SOLDAGEM E DILUIÇÃO .....	32
2.10 CUSTOS DE SOLDAGEM.....	32
2.10.1 Custo do metal de adição .....	33
2.10.2 Custo dos gases de proteção.....	33
2.10.3 Custo de energia elétrica .....	33
2.11 PROJETO DE EXPERIMENTOS.....	34
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	36
3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS.....	38
3.2.1 Especificações do cordão de solda .....	38
3.2.2 Procedimento experimental.....	39
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
4.1 ARAME MACIÇO COM DIÂMETRO DE 1,0 MM .....	42

4.2	ARAME MACIÇO COM DIÂMETRO DE 1,2 MM .....	45
4.3	ARAME MACIÇO COM DIÂMETRO DE 1,32 MM.....	47
4.4	ENERGIA DE SOLDAGEM E DILUIÇÃO .....	49
4.5	TAXA DE DEPOSIÇÃO DE ARAME.....	50
4.6	CUSTOS DE SOLDAGEM.....	51
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo utilizado para efetuar a união de materiais, o qual está presente em praticamente todos os segmentos industriais, sendo aplicado tanto na fabricação de máquinas, equipamentos e estruturas, como na manutenção e recuperação dos mesmos. Dentre os diversos processos de soldagem, destaca-se o processo a arco elétrico com gás de proteção, denominado pela AWS (American Welding Society) como GMAW (Gas Metal Arc Welding), utilizado para a união de aços e suas ligas, por ser de fácil operação e baixo custo, além de produzir juntas com excelentes propriedades mecânicas e possibilitar a automação, o que proporciona maior confiabilidade e controle sobre os parâmetros deste processo.

A correta determinação das características do metal de adição, também chamado de eletrodo ou arame, é uma das variáveis mais importantes para a garantia da qualidade das juntas soldadas, tendo grande influência sobre a produtividade e o custo deste processo. Além da composição química e das propriedades mecânicas do arame, outro fator muito importante a ser levado em consideração é o seu diâmetro. Segundo Machado (1996), o eletrodo utilizado como metal de adição na soldagem GMAW é geralmente disponível em diâmetros de 0.8, 1.0, 1.2 e 1.6 mm, existindo ainda outras bitolas para a soldagem de praticamente todas as ligas ferrosas e muitas não ferrosas, sendo que muitas vezes, a escolha desta variável é baseada em informações de manuais técnicos, orientações de fornecedores e da experiência dos profissionais que atuam na área, o que nem sempre pode resultar nos melhores índices de produtividade e menores custos para o processo em uma determinada aplicação.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

As indústrias sempre buscam alcançar as altas taxas de deposição em seus processos de soldagem, a fim de obter bons índices de produtividade, pois este fator é a relação da quantidade de material depositado na junta por unidade de tempo.

O diâmetro do arame a ser utilizado em uma determinada aplicação é uma característica muito importante para o processo de soldagem a arco elétrico, pois a partir deste fator são selecionados outros parâmetros como a velocidade de alimentação de arame, a tensão do arco elétrico e a velocidade de soldagem, os quais

influenciam sobre a qualidade da junta e também sobre o custo final do processo. Contudo, algumas indústrias ainda erram na escolha do diâmetro de arame ideal para cada situação, pois muitas vezes desconhecem sua real influência sobre alguns fatores como a taxa de deposição, diluição e o seu impacto sobre o custo do processo. Sendo assim, o presente trabalho visa efetuar um estudo comparativo entre diferentes diâmetros de arame maciço utilizados no processo de soldagem MAG pulsado robotizado, aplicado em chapas de aço de baixo carbono, buscando atingir as boas taxas de deposição e diluição, garantindo os aspectos de qualidade exigidos e proporcionando o menor custo para este processo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral, efetuar um estudo comparativo entre três diferentes diâmetros de arame maciço, aplicados no processo de soldagem MAG robotizado com simples deposição sobre chapas de aço carbono ASTM A36, a fim de analisar a influência deste parâmetro sobre as taxas de deposição e diluição, e verificar seu impacto sobre alguns aspectos de custo para deste processo, para a obtenção de uma determinada geometria do cordão de solda.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, este trabalho tem como objetivos específicos:

- Efetuar um estudo teórico sobre as características do processo de soldagem MAG robotizado e verificar quais são os parâmetros que exercem influência sobre o mesmo.
- Realizar cordões de solda através do processo MAG pulsado robotizado, na posição plana, sob a forma de simples deposição sobre chapas e utilizando três diferentes diâmetros de arame maciço, buscando obter um cordão com largura de 10 mm e reforço inferior à 3 mm, de acordo com a norma AWS D1.1 (2010).

- Confeccionar corpos de prova utilizando como metal base o aço ASTM A36, com 6,35 mm de espessura e como metal de adição o eletrodo AWS ER70S-6 com diâmetros de 1.0, 1.2 e 1.32 mm.
- Elaborar um projeto experimental utilizando a metodologia de Taguchi para identificar os melhores níveis de tensão, corrente e velocidade de soldagem, dentro das condições aplicadas para cada diâmetro de arame.
- Realizar ensaio metalográfico nos corpos de prova obtidos com a aplicação dos parâmetros mais favoráveis à obtenção da geometria desejada, para cada diâmetro de arame, e analisar a influência da energia de soldagem aplicada sobre a diluição da solda.
- Verificar as taxas de deposição obtidas nos testes de confirmação através da medição da quantidade de material depositado por tempo de arco aberto.
- Analisar o custo do metal de adição, do gás de proteção e da energia elétrica necessária para a soldagem do cordão especificado com cada diâmetro de arame, e assim identificar o diâmetro ideal para a soldagem na situação proposta, o qual proporcione o menor custo da aplicação e que atenda aos critérios de qualidade.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

A soldagem a arco elétrico com proteção gasosa, denominada pela American Welding Society (AWS) como GMAW (Gas Metal Arc Welding), é também conhecida como soldagem MIG-MAG. A Figura 1 apresenta o esquema básico deste processo de soldagem, o qual consiste na união de materiais através da adição de outro material, chamado de eletrodo ou arame consumível. Este eletrodo é depositado, no estado líquido, sobre a poça de fusão formada no metal base, que é gerada através do arco elétrico e protegida por um fluxo de gás ou mistura de gases, que podem ser inertes, tornando este processo MIG (Metal Inert Gas) ou ainda ativos, tornando o processo MAG (Metal Active Gas).

Este processo, quando adequadamente ajustado, permite a soldagem em todas as posições, garantindo boa estabilidade do arco elétrico, possibilitando o emprego de altas velocidades de soldagem com pouca geração de escória, resultando em juntas soldadas de excelente qualidade, aplicadas em praticamente todos os tipos de metais e suas ligas.

A soldagem a arco elétrico com proteção gasosa pode ser executada de forma semiautomática ou automática e possui excelentes características para a robotização, o que aumenta sua aplicação devido a sua versatilidade e economia (MACHADO, 1996).

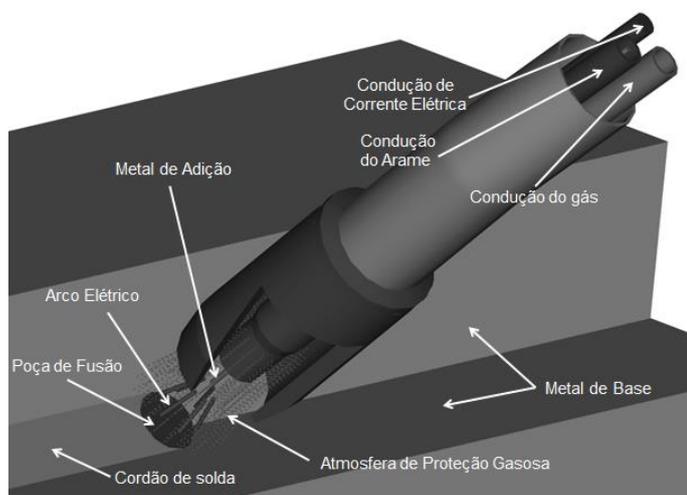


Figura 1: Esquemática do processo GMAW. Fonte: Adaptado de Pires; Loureiro; Bolmsjo, 2006 p. 5.

Fortes (2005) diz que este processo funciona com corrente contínua (CC), normalmente com o eletrodo no polo positivo, configuração a qual é conhecida como polaridades reversa e normalmente são empregadas correntes de soldagem que variam de 50 A até mais que 600 A e tensões de soldagem de 15 V até 32 V, sendo que um arco elétrico autocorrigido e estável é obtido com o uso de uma fonte de tensão constante e com um alimentador de arame de velocidade constante.

O processo de soldagem GMAW é hoje empregado desde em pequenas indústrias, até aquelas responsáveis por grandes produções e alta qualidade, e, devido a sua versatilidade, o mesmo vem elevando sua participação no mercado de soldagem, pois possibilita o destacamento da gota metálica em diferentes níveis de correntes e modos de transferências metálicas, podendo ser aplicado numa ampla faixa de espessura dos materiais, além de proporcionar condições para a soldagem em todas as posições (ALVES, 2009).

## 2.2 EQUIPAMENTOS BÁSICOS

Os equipamentos básicos para a soldagem GMAW convencional, representados pela Figura 2, consistem em uma fonte de potência, um alimentador de arame, regulador de gás e uma tocha de soldagem.

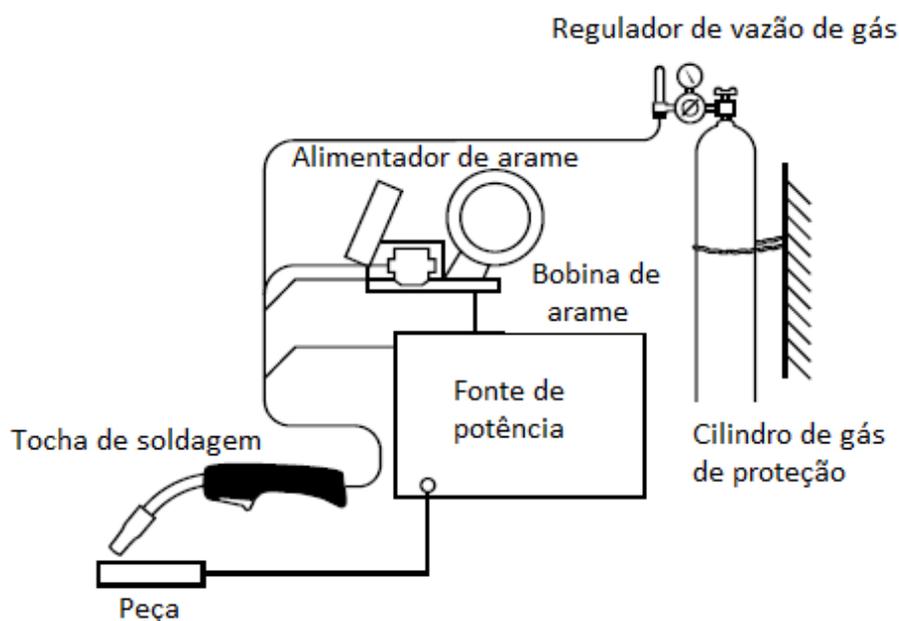


Figura 2: Equipamentos básicos para soldagem GMAW convencional. Fonte: Adaptado de Nadzam, 2011 p. 25.

### **2.2.1 Fontes de potência**

A fonte de potência é o equipamento responsável em produzir saídas de corrente e tensão nos valores desejados e com características adequadas ao processo, permitindo o ajuste de valores para aplicações específicas. Basicamente as fontes de potência têm a função de estabelecer o arco elétrico entre o eletrodo e a peça a ser soldada, a fim de produzir o calor necessário formar a poça de fusão no metal base, e podem ser classificadas como convencionais ou eletrônicas.

As fontes convencionais dependem de sistemas mecânicos ou elétricos para controlar sua saída e no geral, possuem velocidade de resposta baixa e insuficiente para controlar os eventos que ocorrem no arco e na transferência do metal. Já as fontes eletrônicas, inicialmente desenvolvidas na década de 60, possuem funções múltiplas, com elevada velocidade de resposta, o que permite um excelente controle do arco e do modo de transferência de metal durante a operação, além de poder ser programada e conectada a outros equipamentos periféricos como sensores, microprocessadores, computadores e robôs (MODENESI, 2009).

### **2.2.2 Alimentador de arame**

O alimentador de arame tem a função de puxar o metal de adição da bobina, e conduzi-lo através de um conduíte, até a extremidade da tocha. Esta unidade é basicamente composta por um motor de corrente contínua, que pode variar sua velocidade, controlando a alimentação de arame, e conjuntos de rolos pressionados entre si, que tracionam e servem de guias para a condução do arame.

Em sistemas de soldagem robotizados, o alimentador é normalmente montado separado da fonte de soldagem e o eletrodo é alimentado a partir de bobinas (15 a 18 kg) ou barricas (140 a 475 kg), o que minimiza a tempo para a troca do consumível (PIRES, LOUREIRO, BOLMSJO, 2006).

### **2.2.3 Tocha de soldagem**

Existem diversos tipos de tochas de soldagem, projetadas para diferentes aplicações, contudo, seu princípio básico baseia-se em conduzir o arame e o gás de proteção até a região da solda, e também levar a energia de soldagem até o arame.

Uma tocha é basicamente constituída por: um bico de contato fabricado de cobre, que tem a função de conduzir a energia até o arame e direcioná-lo até a peça; um bocal que direciona o fluxo de gás até a região de soldagem e um conduíte conectado entre a tocha e as roldanas do alimentador, que serve para guiar o arame até o bico de contato (FORTES, 2005).

### 2.3 SOLDAGEM ROBOTIZADA

Além de reduzir custos com mão de obra qualificada, a automação na soldagem torna-se cada vez comum devido a um melhor controle sobre os parâmetros de soldagem e conseqüentemente melhor confiabilidade e produtividade no processo, reduzindo os custos de produção. Contudo, o custo inicial para a automação é elevado, o que requer um grande volume de produção para que o investimento seja rentável. (KIM, 1995, apud MCKEE, 1982)

De acordo com a American Welding Society (AWS), a soldagem robotizada é definida como um processo de soldagem efetuado e controlado por um equipamento robótico, sendo que o operador tem um papel ativo no controle de qualidade das juntas soldadas, e, quando encontradas descontinuidades, ações corretivas em programação ou manutenção devem ser tomadas. Existem ainda sistemas de soldagem totalmente automatizados, definidos como automático com controle adaptativo, que utilizam sensores para controlar em tempo real a qualidade da solda e efetuar os devidos ajustes nos parâmetros, não sendo necessário o controle ou intervenção de um operador.

Um robô industrial consiste de um conjunto de elos conectados e articulados, sendo o primeiro elo vinculado, geralmente, a uma base fixa e, no último elo, denominado extremidade terminal, tem-se a ferramenta (tocha de soldagem). Desse modo, o deslocamento da tocha passa a ser controlado segundo a movimentação especificada durante a programação do robô (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011, p. 131).

### 2.4 MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL

O modo pelo qual o metal fundido na ponta do eletrodo se transfere até a poça de fusão é muito importante no processo soldagem GMAW. De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011), o tipo de transferência afeta diretamente a estabilidade do arco elétrico, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido,

nível de respingos gerados e a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem, sendo que para Machado (1996), os principais fatores que determinam o modo com o qual o metal fundido se transfere, desde o eletrodo até a peça são: gás de proteção; polaridade e tipo de corrente (contínua ou pulsada); densidade da corrente; tensão; extensão do eletrodo após o contato elétrico; composição química e diâmetro do eletrodo; características específicas da fonte de potência; pressão do ambiente.

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2004), o processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa inclui, basicamente, quatro técnicas distintas de transferência de metal: transferência por curto circuito, globular, por spray ou aerosol e por arco pulsado.

#### 2.4.1 Transferência por curto-circuito

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011), para a soldagem de peças de pequena espessura ou fora de posição, onde uma baixa energia de soldagem é necessária, a transferência metálica ocorre normalmente por curto circuito, usando baixos valores de tensão e corrente, e, segundo Wainer, Brandi e Mello (2004), neste modo de transferência, o metal é transferido por contato direto entre o eletrodo e a poça de fusão, através de uma gota.

Conforme Cruz (2014), o rápido esfriamento da poça de fusão no modo de transferência por curto circuito, faz com que este processo seja ideal para a soldagem em posições diferentes da posição plana, contudo, a transferência de calor e a fusão são baixas, o que requer uma atenção especial ao soldar materiais de maiores espessuras. O ciclo deste modo de transferência é representado pela Figura 3, sendo que esta sequência se repete aproximadamente entre 50 a 250 vezes por segundo.

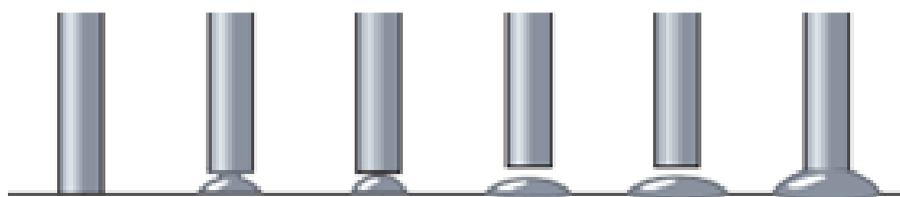


Figura 3: Modo de transferência de metal por curto circuito. Fonte: Cruz, 2014, p. 33 apud modificado de BOC, 2007.

Marques, Modenesi e Bracarense (2011) dizem que este modo é caracterizado pela grande instabilidade no arco elétrico, podendo apresentar intensa formação de respingos, embora a mesma possa ser limitada pela seleção adequada dos parâmetros de soldagem e pela indutância na fonte de energia, de modo que os curtos-circuitos ocorram de forma suave, com valor máximo de corrente, e que a ponta do eletrodo fique parcialmente mergulhada na poça de fusão.

#### 2.4.2 Transferência globular

Quando a corrente e a tensão de soldagem são aumentadas para valores intermediários, acima do máximo recomendado para a soldagem por curto-circuito, a transferência de metal passa a ser globular. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta, contudo, é geralmente maior que o diâmetro do eletrodo. A transferência globular é normalmente evitada, pois é muito imprevisível, sendo caracterizada pelo elevado nível de respingos e limitada à aplicação somente na posição plana, pois as gotas de metal fundido se transferem principalmente até a poça de fusão pela ação da gravidade, conforme ilustrado na Figura 4 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

De acordo com Cruz (2014), a transferência globular pode ser produzida com todos os tipos de gases de proteção, sendo que com a utilização de dióxido de carbono, as gotas se dispersam desordenadamente devido as forças de repulsão que atuam para a ponta do eletrodo. Com os gases a base de argônio, as gotas não são tão grandes e se transferem em uma direção mais axial.

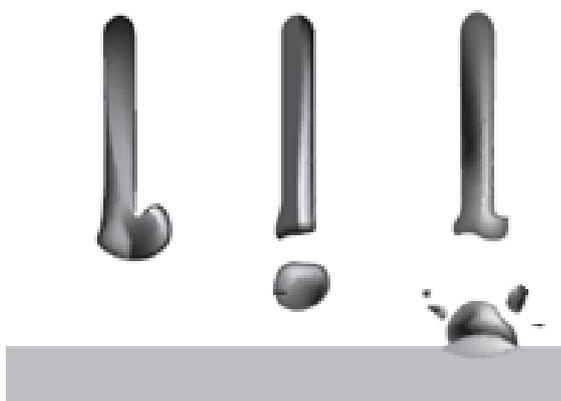


Figura 4: Modo de transferência globular. Fonte: Cruz, 2014, p. 34.

### 2.4.3 Transferência por spray ou aerosol

Aumentando-se a corrente e a tensão de soldagem ainda mais, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a peça diminui e, acima de certa faixa de valores, conhecida como “corrente de transição”, ou seja, a corrente mínima necessária, a transferência de metal torna-se um verdadeiro arco em aerosol (spray). Neste modo, as gotas de metal líquido são muito pequenas, menores que o diâmetro do eletrodo e em grande quantidade (Figura 5). Quase não há incidência de respingos, pois o arco elétrico é bastante estável, o que resulta em um cordão de solda suave e regular (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

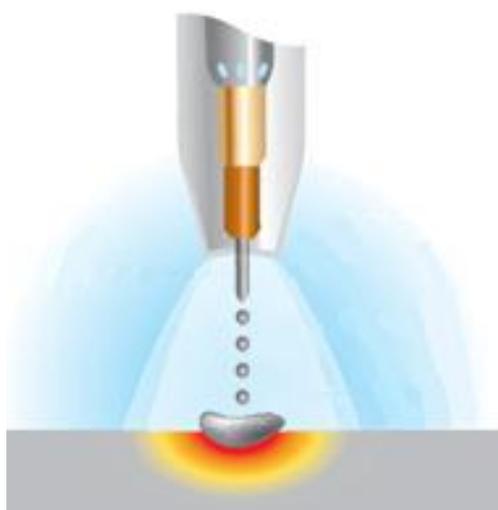


Figura 5: Modo de transferência por spray. Fonte: Cruz, 2014 p. 35.

Segundo Machado (1996), quando comparada aos outros modos, a transferência por aerosol resulta numa maior penetração da solda e em melhores taxas de deposição, devido ao aumento de tensão e corrente, contudo, Marques, Modenesi e Bracarense (2011) destacam algumas restrições e cuidados sobre a aplicação desta transferência.

Na transferência por “spray” às gotas metálicas sofrem a ação de várias forças de origem eletromagnética, que se sobrepõem à ação da força gravitacional e, assim, em princípio, este método seria aplicável a qualquer posição de soldagem. Entretanto, como esta transferência só é possível com correntes relativamente elevadas, não pode ser usada na soldagem de chapas finas, e sua utilização fora da posição plana pode ser problemática devido ao tamanho elevado da poça de fusão, de difícil controle (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011, p. 239).

A corrente de transição é proporcional ao diâmetro do eletrodo e também em menor grau ao seu comprimento, pois há uma relação direta com sua temperatura de fusão. Na Tabela 1, podem-se verificar as correntes de transição para a soldagem com metal de adição de aço de baixo carbono, com diferentes diâmetros de eletrodo e gases de proteção (ASM HANDBOOK, 1993).

Tabela 1  
Correntes de transição para soldagem por spray

Material do Eletrodo	Gás de Proteção	Diâmetro do Arame	Corrente de transição (A)
Aço de baixo carbono	95% Ar - 5% O <sub>2</sub>	1,0	155
		1,2	200
		1,6	265
	92% Ar - 8% CO <sub>2</sub>	1,0	175
		1,2	225
		1,6	290
	85% Ar - 15% CO <sub>2</sub>	1,0	180
		1,2	240
		1,6	295
	80% Ar - 20% CO <sub>2</sub>	1,0	195
		1,2	255
		1,6	345

Fonte: Adaptado de ASM Handbook (1993)

#### 2.4.4 Transferência por arco pulsado

A transferência por arco pulsado é um método controlado, obtido através de perturbações controladas na corrente de soldagem e/ou na alimentação do arame, com o objetivo de transferir o metal de adição com as características desejáveis da transferência por aerosol, mas com níveis menores de corrente de média, de forma a permitir sua utilização em chapas de menor espessura e em todas as posições de soldagem, mantendo uma elevada taxa de deposição de metal.

Este método é possível através da pulsação da corrente de soldagem em dois níveis, um inferior à corrente de transição, denominado corrente de base ( $I_b$ ), que ocorre durante um período de tempo ( $T_b$ ), e outro superior à corrente de transição, denominado corrente de pico ( $I_p$ ), com tempo de duração ( $T_p$ ), conforme representado na Figura 6. Durante o tempo de base a corrente é baixa e uma gota se forma e cresce

na extremidade do arame, sendo a mesma transferida quando a corrente é elevada. Contudo, a introdução de mais variáveis (pulsação) no processo GMAW, acaba dificultando ainda mais a seleção e otimização dos parâmetros de soldagem (FIGUEIREDO, 2005).

Contudo, para superar a dificuldade de seleção de parâmetros, foram desenvolvidas fontes eletrônicas de energia com controle apenas por um botão, nas quais é possível otimizar os parâmetros de pulsação da corrente de soldagem, garantindo a transferência de apenas uma gota por pulso, independente da corrente média de operação ( $I_m$ ) (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

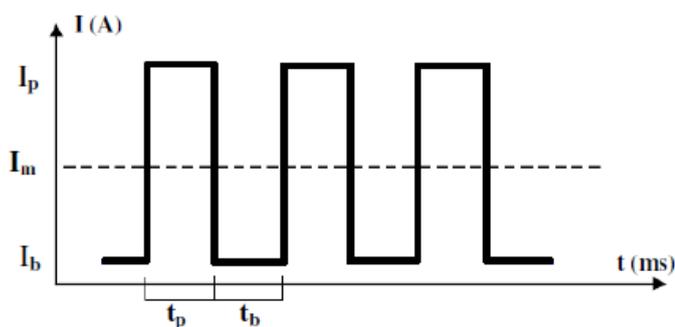


Figura 6: Representação do processo GMAW pulsado. Fonte: Adaptado de Andrade, 2012 p. 17.

Machado (1996), diz que o desenvolvimento de novas fontes de energia controladas eletronicamente tem sido muito importante para a evolução do processo GMAW pulsado, o qual se destaca sobre o sistema convencional devido aos seguintes aspectos:

- Geração de respingos quase nula;
- Fácil início do arco (extremamente atrativo para robotização);
- Soldagem de qualquer espessura e em todas as posições;
- Fontes de potência com alta velocidade de resposta;
- Taxa de deposição cerca de 30% maior que no modo convencional;
- Energia de soldagem menor para o mesmo efeito no modo convencional.

## 2.5 CONSUMÍVEIS

Os dois principais consumíveis do processo GMAW são o gás de proteção e o arame ou eletrodo, cujas características e aplicações estão descritas a seguir.

### 2.5.1 Gás de proteção

A principal função do gás de proteção na maioria dos processos de soldagem é proteger a poça de fusão da atmosfera. No processo GMAW, além de exercer esta função, o gás de proteção tem efeito sobre a abertura e estabilidade do arco elétrico, sobre o modo de transferência de metal, fusão e penetração da solda, velocidade de soldagem, acabamento e geometria do cordão. Gases inertes como o argônio e o hélio, e gases ativos como o dióxido de carbono, são normalmente aplicados neste processo de soldagem, bem como a utilização de misturas destes gases, podendo até haver pequenas adições de oxigênio (ASM HANDBOOK, 1993).

Para a soldagem de metais ferrosos, a adição de pequenas quantidades de gases ativos melhora a estabilidade do arco e a transferência de metal, pois a presença de óxidos facilita a emissão de elétrons. A utilização de misturas de gases, tanto ativos como inertes, em diferentes proporções, permitem melhores condições de soldagem, sendo que na soldagem de aços carbono e de baixa liga, o custo do processo pode ser reduzido com o uso de dióxido de carbono (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

A Tabela 2 apresenta os gases e misturas recomendados para a soldagem de aço carbono no processo MAG em transferência por spray.

Tabela 2

Gases recomendados para soldagem de aço carbono em spray

Metal Base	Espessura	Modo de Transferência	Gás / Mistura
Aço Carbono	> 3.2 mm	Spray Convencional	Ar - 1 % O <sub>2</sub>
			Ar - 2 % O <sub>2</sub>
			Ar - 5 % CO <sub>2</sub>
			Ar - 8 % CO <sub>2</sub>
			Ar - 10 % CO <sub>2</sub>
			Ar - 15 % CO <sub>2</sub>
			Misturas de Ar - CO <sub>2</sub> - O <sub>2</sub>
		Spray Pulsado	Ar - 5 % CO <sub>2</sub>
			Misturas de Ar - He - CO <sub>2</sub>
			Misturas de Ar - CO <sub>2</sub> - O <sub>2</sub>

Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (1993).

### 2.5.2 Metal de adição

No processo de soldagem GMAW, é imprescindível a correta escolha do metal de adição a ser utilizado. Conforme Machado (1996), esta escolha é baseada em requisitos mecânicos e metalúrgicos da junta, além de considerações do custo envolvido, dizendo ainda que os fatores que mais influenciam nesta decisão são:

- O gás utilizado;
- O modo de transferência desejado;
- A posição de soldagem;
- O serviço que a junta executará;
- O meio ambiente;
- O estado da superfície do metal base;
- O nível de constrangimento da junta.

Embora as propriedades mecânicas e os requisitos de serviço influenciem fortemente a seleção do arame, considerações mais genéricas poderão ser mais úteis na maioria das aplicações e dos projetos de junta. Quando a corrente de soldagem, o tamanho da poça de fusão, a quantidade de oxidação, a carepa de usina, e o óleo encontrado na superfície do metal de base aumentam, ou mesmo, quando os teores de dióxido de carbono ou de oxigênio aumentam, os teores de manganês e de silício do arame devem também aumentar para proporcionar a melhor qualidade à solda (FORTES, 2005).

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011), os arames de aço carbono utilizados no processo GMAW são tradicionalmente cobreados, pois este revestimento protege o arame contra corrosão e melhora o contato elétrico entre este e o bico de contato na tocha de soldagem. Estes arames podem ter seção inteiramente metálica, chamados de arames sólidos, ou ser do tipo tubular, formados por uma camada metálica fechada, internamente preenchidos por um fluxo convencional (flux cored) ou uma mistura de pós metálicos (metal cored).

A correta escolha do diâmetro do eletrodo é muito importante, sendo que esta é feita principalmente em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem e de outros fatores que podem limitar o tamanho da poça de fusão ou a quantidade de calor que pode ser cedida à peça (energia de soldagem), sendo que

para cada diâmetro de eletrodo existe uma faixa de corrente de soldagem adequada, de forma que o arco apresente boas condições de operação. (FIGUEIREDO, 2005)

Os arames para a soldagem do aço carbono estão cobertos pela norma AWS A5.18 e são classificados conforme o formato apresentado na Figura 7.

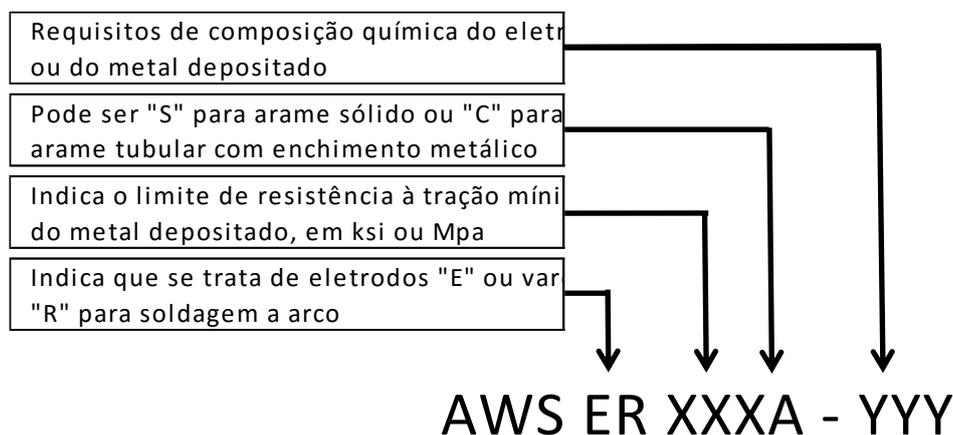


Figura 7: Classificação dos arames. Fonte: Adaptado de MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011, p. 249.

## 2.6 PARÂMETROS DO PROCESSO E SUAS INFLUÊNCIAS

Para a obtenção de uma solda que atenda aos requisitos de qualidade, como acabamento superficial, penetração, resistência mecânica e isenta de descontinuidades, faz-se necessário a seleção correta das variáveis envolvidas neste processo. De acordo com Cayo (2013), estas variáveis são denominadas parâmetros de soldagem, cujas mudanças terão influências qualitativas e quantitativas sobre as características da transferência de calor e metal, bem como sobre a geometria da solda, e, segundo ASM Handbook (1993), as variáveis mais importantes que influenciam na geometria do cordão de solda são a tensão do arco, a velocidade de alimentação de arame, a velocidade de soldagem, o ângulo de inclinação da tocha, diâmetro e extensão do eletrodo.

### 2.6.1 Tensão de soldagem

Wainer, Brandi e Mello (2004) diz que a tensão de soldagem influencia diretamente no tamanho do arco elétrico e na geometria do cordão de solda, principalmente no perfil externo, sendo que, para uma corrente constante,

aumentando-se a tensão, a largura do cordão aumenta e vice-versa. Contudo, valores mais altos de tensão podem gerar porosidade, excesso de respingos e também mordeduras, e, valores muito baixos podem proporcionar sobreposição e porosidade.

### 2.6.2 Velocidade de alimentação de arame

Para Fortes (2005), a velocidade de alimentação de arame está diretamente relacionada à corrente de soldagem, sendo que quando esta é alterada, a corrente varia no mesmo sentido, ou seja, quanto maior for a velocidade de alimentação de arame, maior será a corrente necessária para fundir o eletrodo.

De acordo com Machado (1996), a corrente é o parâmetro com maior influência sobre a taxa de deposição, modo de transferência, penetração e reforço do cordão. A Figura 8 mostra que a taxa de fusão varia quase que linearmente com esse parâmetro, sendo que em altas correntes o efeito é mais pronunciado, provavelmente devido ao aquecimento do eletrodo após o bico de contato.

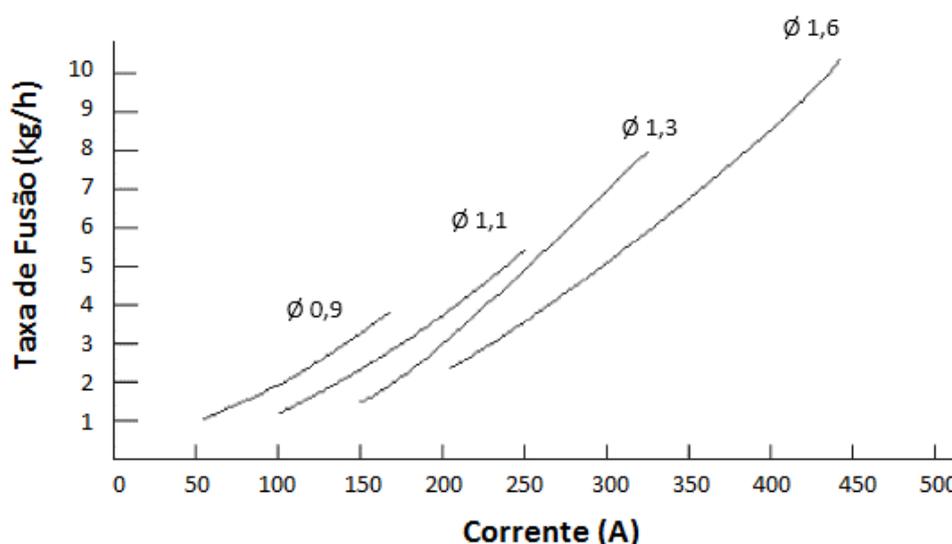


Figura 8: Taxa de fusão em função da corrente para diferentes diâmetros de arame. Fonte: Machado, 1996 p 210

### 2.6.3 Extensão do eletrodo

A extensão do eletrodo, representada pela Figura 9, também chamada de “stickout”, é a distância entre o último ponto de contato elétrico, normalmente a extremidade do bico de contato, e a extremidade do arame em contato com o arco

elétrico. Contudo, esta extensão é de difícil medição com o arco em operação, por isso geralmente toma-se como “stickout” a distância entre o bico de contato e a peça. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)

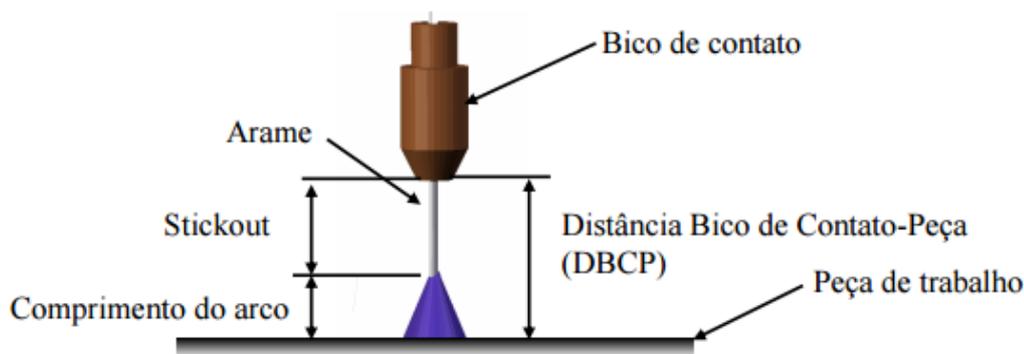


Figura 9: Distância entre o bico de contato e a peça. Fonte: Fischer, 2011 p31.

Grandes extensões de eletrodo resultam em mais material sendo depositado com baixo calor do arco, o que pode causar cordões mais largos e pouca penetração, além de tornar o arco elétrico menos estável (FORTES, 2005).

#### 2.6.4 Velocidade de soldagem

A velocidade com que a tocha se desloca durante a soldagem exerce influência sobre a geometria da poça de fusão e sobre a taxa de deposição, sendo um importante fator na produtividade do processo, devendo sempre ser o maior possível para uma dada aplicação. O aumento da velocidade de soldagem, conforme, mantido os outros parâmetros fixos, causa menor distorção da junta, maior refino dos grãos do metal de solda, menores dimensões do cordão e uma zona termicamente afetada (ZTA) mais estreita, contudo, uma excessiva velocidade de soldagem pode provocar certos defeitos como trincas de solidificação e mordeduras. Isto se deve ao fato de que com a aplicação de velocidades muito altas, o arco elétrico pode não permanecer tempo suficiente na região da solda, o que acarreta em baixa fusão e penetração. Na soldagem de aços carbono, a máxima penetração ocorre em torno de 42 cm/min (MACHADO, 1996).

### 2.6.5 Posicionamento e deslocamento da tocha

A maneira pela qual a tocha posicionada durante a execução de uma solda afeta diretamente as suas características. A posição da tocha é normalmente definida em duas direções — o ângulo relativo ao comprimento do cordão e o ângulo relativo às chapas, conforme ilustrado na Figura 10 e na Figura 11, respectivamente. A Figura 10 apresenta duas técnicas de soldagem, puxando e empurrando. Na técnica puxando a tocha é posicionada de tal modo que o arame seja alimentado no sentido oposto ao do deslocamento do arco, assim o arame é adicionado ao metal de solda já depositado. Na técnica empurrando a tocha é posicionada de tal modo que o arame seja alimentado no mesmo sentido do deslocamento do arco. Nessa técnica o arame é adicionado, em sua maior parte, diretamente na peça. Já a Figura 11 apresenta o ângulo relativo com a chapa, sendo que para uma junta em ângulo é normalmente  $45^\circ$  (FORTES, 2005).

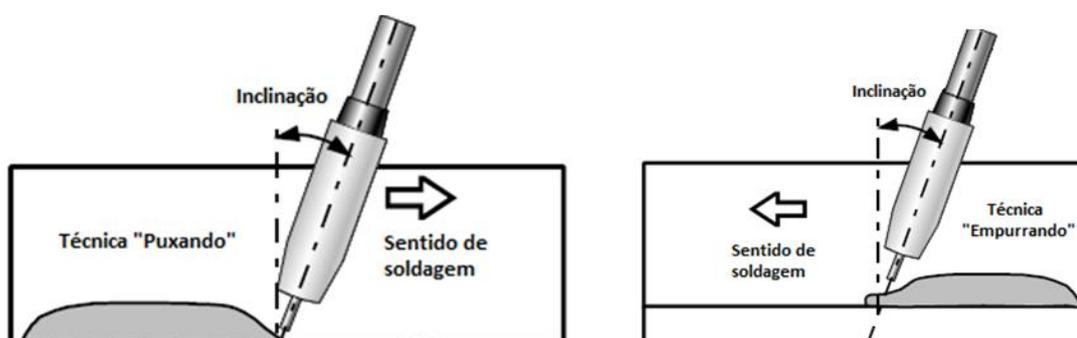


Figura 10: Ângulo relativo ao comprimento do cordão e técnica operatória. Fonte: Adaptado de Kobe Steel, 2015 p26.

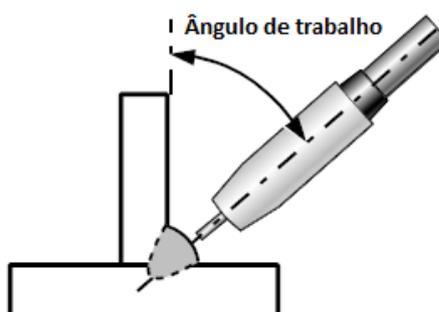


Figura 11: Ângulo relativo a chapa. Fonte: Adaptado de Kobe Steel, 2015 p26.

Com o ângulo de  $90^\circ$  como referência, a alteração no ângulo de deslocamento para o sentido negativo (“empurrando” a tocha) causa redução da penetração, com o cordão se tornando mais largo e plano. Passando para o sentido positivo (“puxando” a tocha) ocorre um notável aumento da penetração, até cerca de  $25^\circ$ , quando a mesma tende a diminuir. Ângulos maiores do que este podem causar sobreposição da junta, além de permitir entrada de ar sob o arco (MACHADO, 1996, p. 212).

## 2.7 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Neste trabalho estão relacionadas somente as principais características de uma junta de topo, devido a sua aplicação nos procedimentos experimentais. A Figura 12 ilustra a geometria de um cordão de solda em uma junta de topo de chanfro reto, onde a perna do cordão é equivalente a largura da face do cordão ( $b$ ), a altura do reforço ( $r$ ) é igual à medida de sua convexidade e a penetração ( $p$ ) é dada pela profundidade alcançada pela fusão do metal a partir da superfície do material de base (QUITES, 2011).

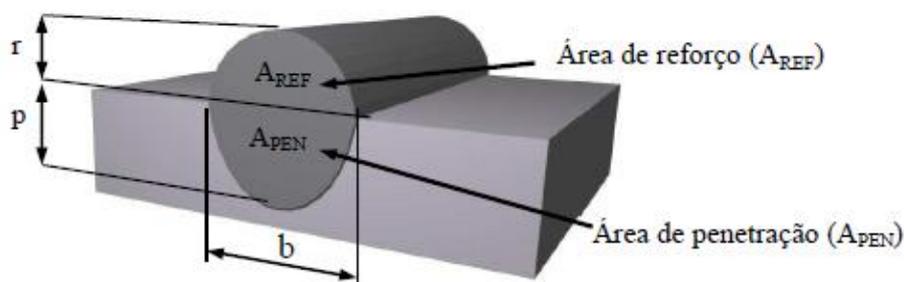


Figura 12: Perfil geométrico do cordão de solda em uma junta de topo. Fonte: Fischer, 2011 p74.

## 2.8 DESCONTINUIDADES NA SOLDA

Por ser um processo que envolve diversas variáveis, a soldagem pode apresentar certas discontinuidades, sendo estas na maioria das vezes provenientes de práticas inadequadas ou parâmetros selecionados de modo incorreto. De acordo com Figueiredo (2005), algumas publicações especializadas de soldagem citam mais de 40 tipos diferentes de discontinuidades encontradas em componentes soldados, contudo neste trabalho serão abordadas somente discontinuidades como trincas, porosidades, fusão e penetração incompletas, e defeitos geométricos do cordão.

### **2.8.1 Trincas**

As trincas são fortes concentradores de tensão e podem favorecer o início de uma fratura frágil em uma estrutura soldada, sendo consideradas as descontinuidades mais graves na soldagem. Este tipo de defeito pode ocorrer na superfície ou na parte interna do cordão de solda, e se localizar em posições transversais, longitudinais ou radiais em relação a este. Seu surgimento pode ocorrer durante a soldagem ou após o resfriamento da junta até a temperatura ambiente (FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Fortes (2005), as trincas não são frequentemente encontradas no processo de soldagem GMAW e os possíveis fatores que podem vir a gerar este tipo de defeito são: composição química incorreta do arame de solda, cordão de solda muito pequeno ou má qualidade do metal base.

### **2.8.2 Porosidade**

A porosidade consiste em bolhas de gás aprisionadas durante a solidificação do metal, podem apresentar tamanhos variados e se distribuir aleatoriamente ao longo do cordão, tanto na superfície como internamente. São causadas por diversos fatores como: incorreta vazão de gás de proteção; correntes de ar excessivas no local de soldagem e presença de óleos, oxidação, carepa, tinta sobre a superfície a ser soldada. Parâmetros incorretos do processo como tensão muito baixa ou muito elevada, transferência metálica ruim e variações na velocidade de alimentação de arame, também podem gerar este tipo de descontinuidade, pois estes fatores causam turbulência na poça de fusão, que tende a romper a envoltória do gás de proteção e provocar contaminação da poça de fusão pela atmosfera (FORTES, 2005).

### **2.8.3 Fusão incompleta**

A fusão incompleta refere-se à ausência, em algum ponto do cordão, de fusão entre o metal de solda e a superfície do metal base, sendo normalmente resultante do não aquecimento adequado do metal presente na junta ou da presença de camadas de óxidos refratários. A fusão incompleta em uma junta soldada pode facilitar o aparecimento e a propagação de trincas, pois é um grande concentrador de tensões (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

### 2.8.4 Falta de penetração

Quando a raiz de uma junta soldada não é preenchida completamente ou quando um cordão não penetra suficientemente na espessura do metal base, existe falta de penetração, sendo que esta falha reduz a seção útil da solda e age como um concentrador de tensões. Normalmente a falta de penetração é causada pela aplicação de uma corrente de soldagem muito baixa ou pelo ângulo incorreto da tocha (FORTES, 2005).

## 2.9 ENERGIA DE SOLDAGEM E DILUIÇÃO

Machado (2000), diz que o calor necessário para formar o cordão de solda é proveniente do arco elétrico gerado pela fonte de potência, contudo nem toda a energia gerada é transferida ao metal base, pois parte desta é dissipada ao meio por radiação e convecção. Desta forma, a quantidade de energia fornecida ao cordão de solda por unidade de comprimento, ou seja, a energia de soldagem é dada pela equação 1.

$$E = \eta \frac{UI}{v} \quad (1)$$

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

Já diluição da solda na junta pode ser calculada através da equação 2, sendo que este fator indica a quantidade de metal de adição presente na zona fundida, estando esta diretamente relacionada com a energia de soldagem, ou seja, quanto maior for a energia de soldagem, maior será a diluição da solda (ALVES, 2009 apud PANANI e MURUGAN, 2007).

$$Diluição = \frac{\text{Área da penetração}}{\text{Área da penetração} + \text{Área do reforço}} \times 100 = \% \quad (2)$$

## 2.10 CUSTOS DE SOLDAGEM

A análise e acompanhamento dos custos é um fator primordial para que as empresas se mantenham competitivas no mercado, sendo que menores custos implicam em maiores lucros e maior competitividade. Marques, Modenesi e Bracarense (2011) apresentam através da equação 3, de modo simplificado, o custo total (CT) de um processo de soldagem qualquer.

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC = R\$ \quad (3)$$

Onde CMO = custo de mão de obra, CC = custo dos consumíveis, CE = custo da energia elétrica, CM = custo de manutenção, CD = custo de depreciação e CMC = custos de outros materiais de consumo.

### 2.10.1 Custo do metal de adição

O custo do metal de adição (CMA) depositado sobre a junta pode ser estimado pelo produto da massa de metal depositado e o custo do arame, conforme a equação 4.

$$CMA (R\$) = \text{massa do metal depositado (kg)} \times \text{custo do arame (R\$/kg)} \quad (4)$$

### 2.10.2 Custo dos gases de proteção

A equação 5 apresenta o cálculo do custo dos gases de proteção (CG) aplicados no processo de soldagem, obtido através do produto da vazão utilizada pelo tempo de arco aberto e o preço do metro cúbico do gás, sendo que a constante 60000 usada no denominador permite obter o valor do custo dos gases em reais, utilizando as unidades usuais de medida das demais grandezas da equação.

$$CG (R\$) = \frac{\left[ \text{vazão de gás} \left( \frac{l}{\text{min}} \right) \times \text{tempo de arco aberto (s)} \times \text{custo do gás} \left( \frac{R\$}{m^3} \right) \right]}{60000} \quad (5)$$

### 2.10.3 Custo de energia elétrica

O custo total com energia elétrica pode ser mensurado conforme a equação 6, onde PE é o preço da energia elétrica, PES e a potência elétrica de saída, obtida através do produto da tensão (V) pela corrente de soldagem (A), T é o tempo de arco aberto e E é a eficiência elétrica do equipamento.

$$CE \text{ (R\$)} = \frac{PE \text{ (R\$/kWh)} \times PES \text{ (kW)} \times t \text{ (h)}}{E \text{ (\%)}} \quad (6)$$

## 2.11 PROJETO DE EXPERIMENTOS

Para a otimização de processos, busca-se a utilização de técnicas clássicas de planejamento, como o planejamento fatorial completo ou fracionado e o método de Taguchi. Estas técnicas servem para analisar o efeito que diversos fatores ou parâmetros provocam nos resultados de um experimento. (COLOMBARI, 2004)

De acordo com Correia e Cardoza, 2004, o principal objetivo da metodologia Taguchi é de melhorar as características de um processo ou produto, através da identificação e ajuste dos seus fatores controláveis, que irão minimizar a variação do produto final, em relação ao seu objetivo. Ao ajustar os fatores no seu nível ótimo, os produtos podem ser fabricados de maneira a que se tornem mais robustos a toda e qualquer mudança que possa ocorrer e que seja incontrolável.

Segundo Button, 2012, este método propõe que se analise a resposta média para cada combinação no arranjo interno, e que a variabilidade seja analisada escolhendo uma razão sinal-ruído (SN) apropriada, sendo que três razões SN padrão são amplamente empregadas, sendo elas:

- Nominal é melhor (SNT), usada quando se deseja reduzir a variabilidade em torno de um valor nominal, representada pela equação 7.

$$SNT = 10 \cdot \log \left( \frac{y^2}{s^2} \right) \quad (7)$$

SN= Transformação do Sinal/ ruído em decibéis;

$y^2$ = Valor médio ao quadrado;

$S^2$ = Variância das respostas de cada experimento.

- Quanto maior melhor (SNL), usada quando se deseja maximizar os resultados, conforme equação 8.

$$SNL = -10 \log(1/n \sum_{i=1}^n 1/y_i^2) \quad (8)$$

SN= Transformação do Sinal/ Ruído em decibéis

n= Número de observações;

$y_i^2$ = l-néssima resposta para cada experimento.

- Quanto menor melhor (SNS), usada quando se deseja minimizar os resultados, conforme equação 9.

$$SNS = -10 \log(1/n \sum_{i=1}^n y_i^2) \quad (9)$$

SN= Transformação do Sinal/ Ruído em decibéis

n= Número de observações;

$y_i^2$ = l-néssima resposta para cada experimento.

### 3. METODOLOGIA

Nesta secção serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados na elaboração deste trabalho, bem como os métodos e procedimentos aplicados para a execução dos testes experimentais.

#### 3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os materiais e equipamentos necessários para a elaboração do projeto experimental foram disponibilizados pela Metalúrgica NETZ, empresa fabricante de implementos agrícolas, situada na cidade de Santa Rosa, Rio Grande do Sul.

O metal base escolhido para a execução dos testes foi o aço ASTM A36, o qual apresenta 0,29% de carbono equivalente e é uma das matérias primas com maior aplicação nesta empresa. Assim, para a fabricação dos corpos de prova, foram utilizadas chapas com 6,35 mm de espessura, seccionadas através do processo de corte a laser, na forma de retângulos com dimensões de 25 x 250 mm. Após o corte, as chapas foram submetidas ao processo de jateamento com granalha de aço esférica, para efetuar a limpeza e remoção dos detritos e impurezas presentes na superfície da chapa e a massa dos corpos de prova foi medida com a utilização de uma balança digital da marca Toledo, com capacidade de 5 kg e precisão de 5 g.

Para assegurar que os parâmetros do processo fossem mantidos constantes durante a execução dos experimentos, a soldagem foi efetuada em uma célula robotizada SUMIG, modelo Anglecell A, com capacidade para efetuar a soldagem de peças com dimensões de até 1000 x 750 mm, composta por duas janelas de acesso independentes. Esta célula é equipada por um robô de soldagem da marca OTC Daihen, modelo All – B4, articulado verticalmente com seis graus de liberdade e com controle de vibração integrado, e também por uma fonte de potência inversora de frequência sinérgica pulsada, também da marca OTC Daihen, modelo DP400 (Figura 13), com curva característica tensão constante e polaridade do eletrodo positiva (CCEP), com saída de corrente de até 400 A, podendo ser configurada para a soldagem por curto-circuito, aerosol (spray) e por arco pulsado, equipada com um alimentador de arame composto por quatro roldanas, com capacidade de alimentação de até 22 m/min.

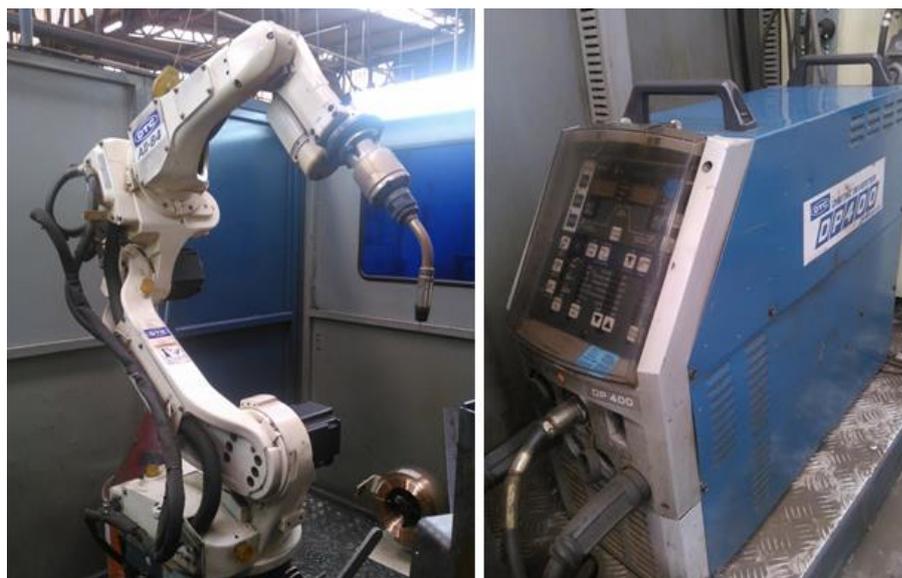


Figura 13: Robô de soldagem All – B4 e fonte de potência DP400

O metal de adição utilizado nos testes foi o arame maciço classificado pela norma AWS A5.18 como ER70S-6, da marca Belgo Bekaert Arames, modelo BME-C4, em três diferentes diâmetros: 1.0, 1.2 e 1.32 mm, e a proteção da poça de fusão foi efetuada por uma mistura de gás composta por 95% de argônio (Ar) e 5% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), com uma vazão constante de 18 litros por minuto (l/min) para todos os ensaios.

Os cordões de solda foram feitos na posição plana, com a tocha posicionada de modo perpendicular em relação ao corpo de prova, na forma de simples deposição, técnica também conhecida como “*bead-on-plate*”, sendo que para o posicionamento e fixação dos corpos de prova utilizou-se um dispositivo, conforme apresentado na Figura 14.



Figura 14: Cordão depositado sobre o corpo de prova fixo no dispositivo

Após a soldagem dos corpos de prova conforme o projeto experimental, os mesmos foram seccionados ao meio com auxílio de uma máquina de corte, sendo então lixados com uma máquina de polimento e lixas com granulometria de 220, 320, 400 e 600. Após o lixamento foi efetuado o ataque químico com Nital 15%, para a visualização da geométrica interna das soldas efetuadas.

## 3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS

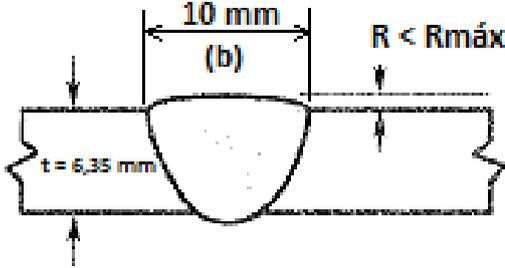
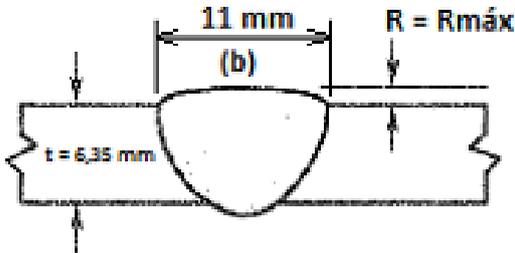
### 3.2.1 Especificações do cordão de solda

Conforme apresentado na revisão da literatura, o processo de soldagem GMAW é bastante complexo, pois possuiu diversas variáveis envolvidas que exercem influência sobre a geometria da solda e as resultantes deste processo. Para que os objetivos do presente trabalho fossem alcançados, fez-se necessária a definição de qual seria a geometria do cordão a ser obtida utilizando os três diferentes diâmetros de arame para que assim fosse possível identificar os níveis de corrente, tensão e velocidade de soldagem mais favoráveis para a obtenção desta geometria, em cada situação experimental proposta.

O dimensionamento do cordão de solda foi efetuado com base na norma AWS D.1.1 (2010), sendo que a largura máxima para um cordão depositado com apenas um passe é de 10 mm, assim, larguras maiores que este valor exigem a deposição de mais de um cordão. Já o reforço da solda é determinado, de acordo com a norma, em função da espessura do metal base a ser soldado. Além disso, a empresa concedente dos materiais possui um procedimento interno de soldagem, o qual determina que a largura do cordão de solda não deve ser inferior ao seu valor nominal, podendo esta ficar 1 mm maior, assim o cordão a ser depositado sobre as chapas de aço ASTM A36, utilizando os três diferentes diâmetros de arame maciço, deverá ser efetuado em apenas um passe e apresentar uma largura de 10 à 11 mm, não podendo ficar menor que 10 mm, e ainda apresentar um reforço máximo de 3 mm, pois a espessura do metal base escolhida foi de 6,35 mm. As especificações geométricas do cordão de solda desejado estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3

Especificações geométricas do cordão de solda para os experimentos

(A) Perfil de solda desejável	(B) Perfil de solda aceitável
	
<b>Espessura (t)</b>	<b>Reforço Máximo (Rmáx)</b>
≤ 25 mm	3 mm

Fonte: Adaptado de AWS D1.1, 2010

### 3.2.2 Procedimento experimental

Após a programação da trajetória a ser executada pelo robô de soldagem, foram realizados testes exploratórios com cada diâmetro de arame, com o objetivo de coletar os parâmetros iniciais para os experimentos, que proporcionassem uma geometria próxima à geometria desejada e resultassem em soldas sem defeitos aparentes. Primeiramente foram definidos três parâmetros de entrada para serem variados durante a execução dos testes, sendo estes: tensão, corrente (velocidade de alimentação de arame) e velocidade de soldagem, em três diferentes níveis para cada diâmetro de arame, estando estes apresentados no quadro 1, logo abaixo.

Fator	Unidade	Nível	Diâmetro do arame		
			1,0 mm	1,2 mm	1,32 mm
Corrente	A	Inferior	240	300	330
		Intermediário	250	310	340
		Superior	260	320	350
Tensão	V	Inferior	24	29	30
		Intermediário	26	30	31
		Superior	27	31	32
Vel. Soldagem	cm/min	Inferior	55	65	73
		Intermediário	60	70	78
		Superior	65	75	82

Quadro 1: Parâmetros e seus respectivos níveis aplicados nos experimentos

Os demais parâmetros do processo foram mantidos constantes durante a execução de todos os testes, sendo que estes:

- Vazão do gás de proteção: 18 l/min
- DBCP (Stickout): 15 mm
- Posição de soldagem: Plana
- Ângulo de inclinação da tocha em relação ao cordão e chapa: 90°

Como o objetivo deste trabalho é obter a mesma geometria do cordão de solda utilizando diferentes diâmetros de arame, os níveis dos fatores de entrada, ou seja, corrente, tensão e velocidade de soldagem, tiveram que ser alterados em cada situação proposta, pois conforme visto na revisão da literatura, existem envelopes operacionais que delimitam a aplicação destes parâmetros para cada diâmetro de arame. Assim, buscou-se através da utilização da metodologia Taguchi, a elaboração de três projetos experimentais distintos, sendo um para cada diâmetro de arame, a fim de identificar os níveis para cada um dos três fatores, mais favoráveis para a obtenção da geometria desejada para o cordão.

Os projetos experimentais foram desenvolvidos com a utilização do software Minitab 16, e devido ao número de fatores e níveis, que foram criadas três matrizes experimentais do tipo L9, sendo uma para cada diâmetro de arame, as quais permitiram uma interação entre os parâmetros avaliados e seus respectivos níveis, com o intuito de identificar os melhores parâmetros de intensidade de corrente, tensão e velocidade de soldagem, para obter como saída, a geometria especificada para o cordão, em cada diâmetro de arame em estudo.

<b>N°</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Vel. Deslocamento (cm/min)</b>
CP1	240	24	55
CP2	240	25,5	60
CP3	240	27	65
CP4	250	24	60
CP5	250	25,5	65
CP6	250	27	55
CP7	260	24	65
CP8	260	25,5	55
CP9	260	27	60

Quadro 2: Projeto experimental para o arame de diâmetro 1,0 mm

<b>N°</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Vel. Deslocamento (cm/min)</b>
CP10	300	29	65
CP11	300	30	70
CP12	300	31	75
CP13	310	29	70
CP14	310	30	75
CP15	310	31	65
CP16	320	29	75
CP17	320	30	65
CP18	320	31	70

Quadro 3: Projeto experimental para o arame de diâmetro 1,2 mm

<b>N°</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Vel. Deslocamento (cm/min)</b>
CP19	330	30	73
CP20	330	31	78
CP21	330	32	82
CP22	340	30	78
CP23	340	31	82
CP24	340	32	73
CP25	350	30	82
CP26	350	31	73
CP27	350	32	78

Quadro 4: Projeto experimental para o arame de diâmetro 1,32 mm

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a soldagem dos corpos de prova conforme os parâmetros definidos em cada projeto experimental, os mesmos foram analisados visualmente, a fim de verificar a existência de descontinuidades como mordedura, trinca e porosidade, sendo que estas não foram evidenciadas em nenhuma situação aplicada.

### 4.1 ARAME MACIÇO COM DIÂMETRO DE 1,0 mm

Os resultados dimensionais das variáveis de saída largura e reforço referente a matriz experimental criada para o arame maciço de diâmetro de 1,0 mm, utilizando a metodologia de Taguchi, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4

Resultados dos projetos experimentais para o arame de 1,0 mm

Nº	Largura	Reforço
CP1	10,38	2,69
CP2	10,59	2,81
CP3	9,32	2,79
CP4	10,31	2,66
CP5	9,20	2,8
CP6	11,35	2,42
CP7	9,11	2,87
CP8	11,15	2,76
CP9	10,78	2,41

Em todas as situações aplicadas, a dimensão do reforço da solda não ultrapassou o limite máximo de 3 mm, conforme especificado pela AWS D1.1 (2010) para a espessura de 6,35 mm, contudo, na tabela de respostas se pode verificar que a largura do cordão apresentou grandes variações nas diferentes condições de soldagem aplicadas. Sendo assim, se fez necessária a identificação dos parâmetros de entrada favoráveis à obtenção da largura desejada.

Para avaliar de maneira mais consistente a influência dos três fatores de entrada (corrente, tensão e velocidade de soldagem) aplicados em cada um dos nove corpos de prova soldados com o arame maciço de 1,0 mm de diâmetro sobre a largura do cordão de solda, as respostas da matriz experimental foram submetidas à análise de variância, sendo que no presente trabalho, considerou-se como critério de análise, que para um determinado fator afetar estatisticamente a largura, o nível obtido deverá ser inferior a 5%, ou seja, representar uma confiança estatística de 95%.

Com o auxílio do software Minitab 16, foi elaborado o estudo da variância das respostas observadas, sendo que este apresentou um resultado com 95% de certeza, de que dentre os três fatores variados nos experimentos, a velocidade de soldagem foi o qual apresentou influência significativa sobre a largura do cordão de solda, pois o valor de P foi menor que 0,05, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5

Análise de variância da largura do cordão efetuado com arame 1,0 mm

Fonte	GL	SQ	QM	Valor de F	Valor-P
Corrente	2	0,1022	0,0511	1,2700	0,4410
Tensão	2	0,4758	0,2379	5,9000	0,1450
Vel. Soldagem	2	5,0450	2,5225	62,5900	0,0160
<b>Erro</b>	2	0,0806	0,0403		
<b>Total</b>	8	5,7036			

De acordo com a revisão da literatura, a tensão e a corrente também são fatores que exercem influência sobre a largura do cordão de solda, contudo, dentro dos níveis aplicados neste trabalho e de acordo com as respostas obtidas, nada se pode afirmar sobre a influência destes parâmetros, pois o valor de P obtido através dos testes foi maior do que 0,05, expressando uma baixa confiabilidade nos resultados. Contudo, é possível verificar a influência destes fatores através do valor de F, sendo que quanto maior for este valor, maior será a influência do parâmetro sobre a largura do cordão. Assim, os fatores de maior influência sobre a largura do cordão de solda obtidos nos experimentos foram, respectivamente, a velocidade de soldagem, tensão e a corrente, o que condiz com os estudos teóricos.

Com o objetivo de identificar quais foram os parâmetros mais favoráveis para a obtenção do cordão de solda com a largura especificada, calculou-se a razão sinal-ruído (S/R), a qual apresenta uma relação inversamente proporcional com a variação

obtida nos experimentos, portanto, quanto maior for seu valor, menor será a variabilidade da condição experimental para o processo.

Conforme especificado anteriormente, a largura definida para o cordão de solda neste trabalho não pode ser inferior a 10 mm nem superior a 11 mm, portanto utilizou-se a relação “nominal é melhor”, utilizando como valor nominal para a largura o valor intermediário, ou seja, 10,5 mm. Sendo assim, quanto mais próximo a resposta obtida estiver de 10,5 mm, melhor será o resultado e mais alto será o valor da razão S/R. A Figura 15 apresenta os valores da razão S/R, para o experimento realizado com o arame de diâmetro de 1,0 mm e com base nos resultados apresentados nos gráficos, pode-se verificar que os parâmetros mais favoráveis à obtenção de um cordão com 10,5 mm de largura são:

- Corrente: 240 A;
- Tensão: 24 V;
- Velocidade de soldagem: 60 cm/min.

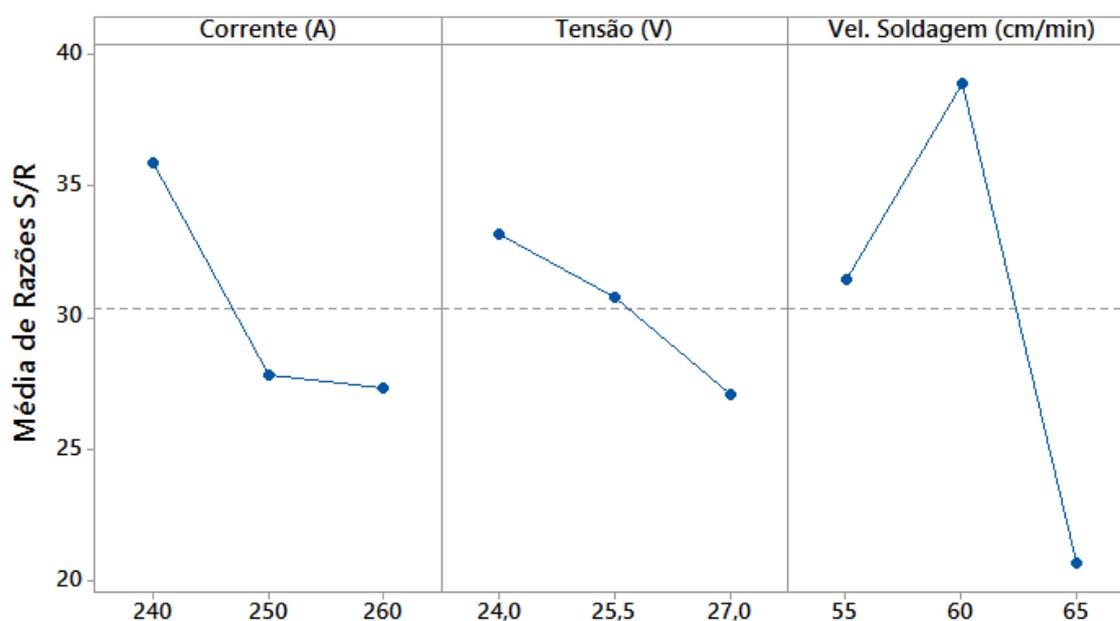


Figura 15: Razão S/R para o arame de diâmetro 1,0 mm

Utilizando estes parâmetros, um novo corpo de prova foi soldado, sendo que este confirmou o estudo efetuado para a largura, apresentando um valor de 10,65 mm, ficando dentro da faixa de tolerância especificada. Este corpo de prova também apresentou um reforço inferior a 3 mm e nele não foram identificadas descontinuidade.

A macrografia apresentada na Figura 16 mostra a geometria completa deste corpo de prova, onde as medições foram efetuadas através do software ImageJ, sendo que no campo de resultados, o item 1 equivale à largura do cordão, item 2 ao reforço, item 3 a profundidade da penetração, item 4 à área da penetração e o item 5 à área do reforço.



Figura 16: Corpo de prova otimizado para arame 1,0 mm

#### 4.2 ARAME MACIÇO COM DIÂMETRO DE 1,2 mm

A Tabela 6 apresenta os resultados de largura e reforço obtidos nos nove corpos de prova soldados com o arame maciço de 1,2 mm de diâmetro.

Tabela 6

Resultados dos projetos experimentais para o arame de 1,2 mm

Nº	Largura	Reforço
CP10	10,60	2,4
CP11	10,65	2,13
CP12	10,19	2,46
CP13	10,41	2,52
CP14	9,78	2,74
CP15	11,36	2,7
CP16	9,53	2,1
CP17	11,18	2,89
CP18	10,98	2,23

Em todas as situações aplicadas com este diâmetro de arame, a dimensão do reforço da solda não ultrapassou o limite máximo de 3 mm, contudo, assim como no experimento com arame de diâmetro de 1,0 mm, a tabela de respostas mostra que a largura do cordão também apresentou variações nas diferentes condições de

soldagem, assim, estas respostas foram submetidas à análise de variância, e de acordo com a Tabela 7, pode-se afirmar com uma confiança estatística de 95%, que velocidade de soldagem e a tensão, respectivamente, foram os fatores que influenciaram significativamente a largura do cordão pois os valores de P foram inferiores à 0,05. Dentro das condições aplicadas nada se pode afirmar estatisticamente quanto à influência da corrente sobre a largura do cordão.

Tabela 7

Análise de variância da largura do cordão efetuado com arame 1,2 mm

Fonte	GL	SQ	QM	Valor de F	Valor-P
Corrente	2	0,01047	0,00523	0,35000	0,73900
Tensão	2	0,66127	0,33063	22,34000	0,04300
Vel. Soldagem	2	2,32347	1,16173	78,50000	0,01300
Erro	2	0,02960	0,01480		
Total	8	3,02480			

Após a análise das respostas, calculou-se a razão sinal-ruído (S/R), conforme Figura 17 e considerando a relação nominal é melhor, ou seja, 10,5 mm, larguras mais próximas deste valor serão obtidas utilizando os seguintes parâmetros:

- Corrente: 300 A;
- Tensão: 29 V;
- Velocidade de soldagem: 70 cm/min.

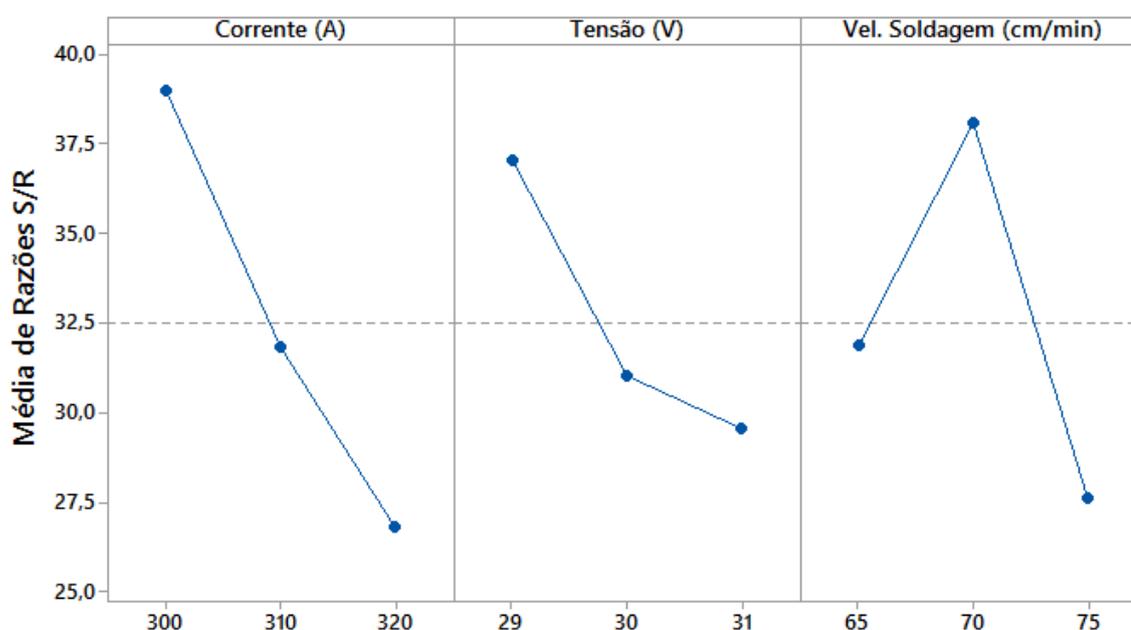


Figura 17: Razão S/R para o arame de diâmetro 1,2 mm

Utilizando os parâmetros favoráveis à obtenção de larguras de 10,5 mm, um novo corpo de prova foi soldado, sendo que este confirmou o estudo efetuado, apresentando um cordão com largura de 10,36 mm, ficando dentro da faixa de tolerância especificada. Este corpo de prova apresentou um reforço de 2,56 mm, valor inferior ao limite de 3 mm, e também não foram identificadas descontinuidades. A Figura 18 apresenta a macrografia do corpo de prova e seus respectivos resultados, coletados através do software ImageJ, sendo que o item 1 equivale à largura do cordão, item 2 ao reforço, item 3 a profundidade da penetração, item 4 à área da penetração e o item 5 à área do reforço.

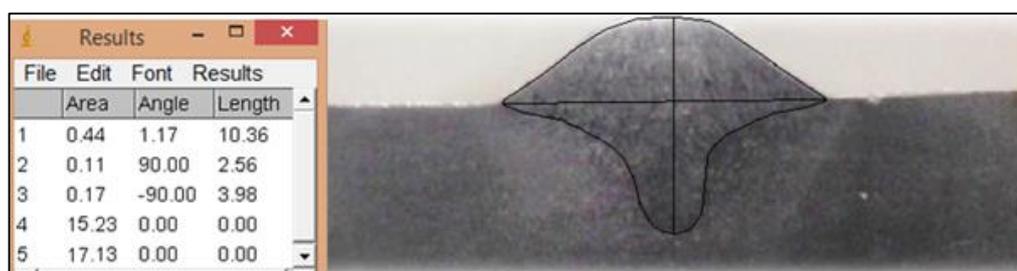


Figura 18: Corpo de prova otimizado para arame 1,2 mm

#### 4.3 ARAME MACIÇO COM DIÂMETRO DE 1,32 mm

Conforme se pode observar na Tabela 8, os valores dos reforços obtidos em todos os testes foram inferiores a 3 mm, ficando dentro do especificado, contudo os corpos de prova CP21, CP23 e CP25, nos quais foram aplicados os maiores níveis de velocidade de soldagem, apresentaram larguras menores que 10 mm.

Tabela 8

Resultados dos projetos experimentais para o arame de 1,32 mm

Nº	Largura	Reforço
CP19	10,43	2,53
CP20	10,38	2,75
CP21	9,57	2,9
CP22	10,34	2,66
CP23	9,22	2,19
CP24	10,97	2,82
CP25	8,99	2,79
CP26	10,86	2,54
CP27	10,33	2,88

Através do estudo da variância dos valores de largura, pode-se afirmar que dentre os três fatores variados nos experimentos, a velocidade de soldagem foi o qual exerceu influência significativa sobre a largura do cordão de solda, sendo que o valor de P foi menor que 0,05, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9

Análise de variância da largura do cordão efetuado com arame 1,32 mm

Fonte	GL	SQ	QM	Valor de F	Valor-P
Corrente	2	0,20560	0,01028	0,20000	0,83500
Tensão	2	0,21002	0,10501	2,01000	0,33200
Vel. Soldagem	2	3,58082	1,79041	34,34000	0,02800
<b>Erro</b>	2	0,10429	0,05214		
<b>Total</b>	8	3,91569			

Com base nos valores de F obtidos neste estudo, pode-se verificar também que o segundo fator que mais influenciou sobre a largura do cordão foi a tensão, pois seu valor foi mais alto do que o da corrente.

Por fim, também foram calculadas as razões de sinal-ruído (S/R) para este diâmetro de arame, e considerando que a relação nominal é melhor, larguras de 10,5 mm serão obtidas utilizando os seguintes parâmetros:

- Corrente: 330 A;
- Tensão: 30 V;
- Velocidade de soldagem: 78 cm/min.

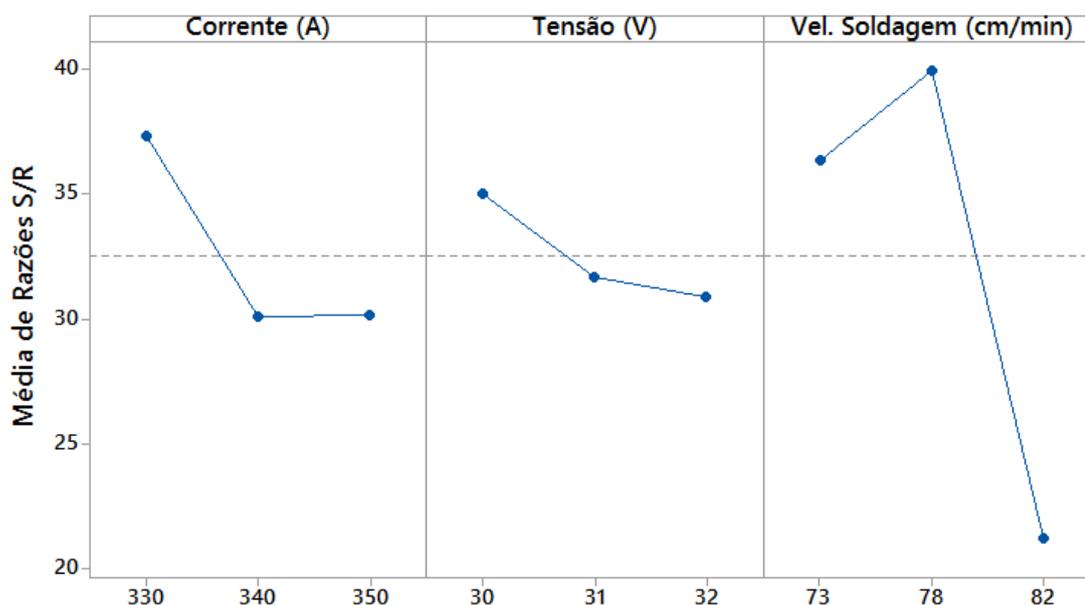


Figura 19: Razão S/R para o arame de diâmetro 1,32 mm

Assim, um novo corpo de prova foi soldado aplicando os parâmetros indicados pela razão sinal-ruído (S/R), sendo que este confirmou o estudo efetuado pois apresentou uma largura de 10,29 mm e um reforço de 2,35 mm, ficando dentro das especificações estabelecidas para o cordão. A Figura 20 apresenta a macrografia deste corpo de prova, sendo que no campo de resultados, o item 1 equivale à largura do cordão, item 2 ao reforço, item 3 a profundidade da penetração, item 4 à área da penetração e o item 5 à área do reforço.

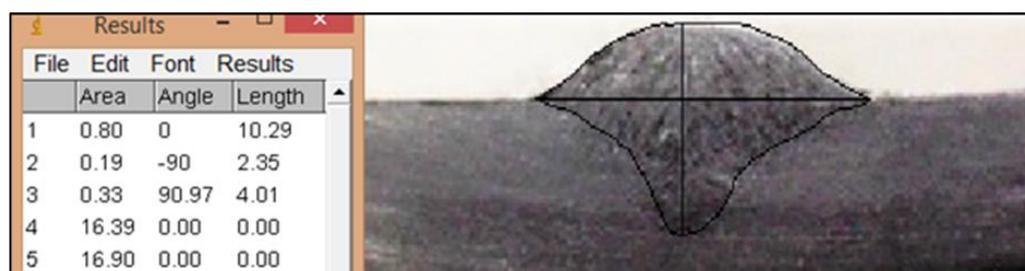


Figura 20: Corpo de prova otimizado para arame 1,32 mm

#### 4.4 ENERGIA DE SOLDAGEM E DILUIÇÃO

Conforme visto na revisão da literatura, a energia de soldagem é descrita como a quantidade de energia imposta por determinada unidade de comprimento do cordão de solda pelo deslocamento de uma fonte de calor, sendo que esta está diretamente associada com a diluição da solda, portanto, quanto maior for a energia aplicada sobre a peça, maior será a diluição da solda.

A diluição é um aspecto fundamental a ser controlado no processo de soldagem, pois está relacionada à resistência da solda sobre uma determinada junta. A Figura 21 apresenta as taxas de diluição obtidas nos corpos de prova soldados com os parâmetros ideais para a obtenção da geometria desejada com cada diâmetro de arame maciço, considerando um rendimento do arco elétrico igual a 100%. Pode-se verificar que a variação na taxa de diluição seguiu os conceitos teóricos vistos anteriormente, pois devido à aplicação de maiores energias de soldagem, houve aumento relativo na diluição da solda, assim o corpo de prova soldado com o arame de diâmetro 1,32 mm apresentou a melhor taxa de diluição, sendo que quase a metade do metal depositado encontrou-se sobre a zona fundida.

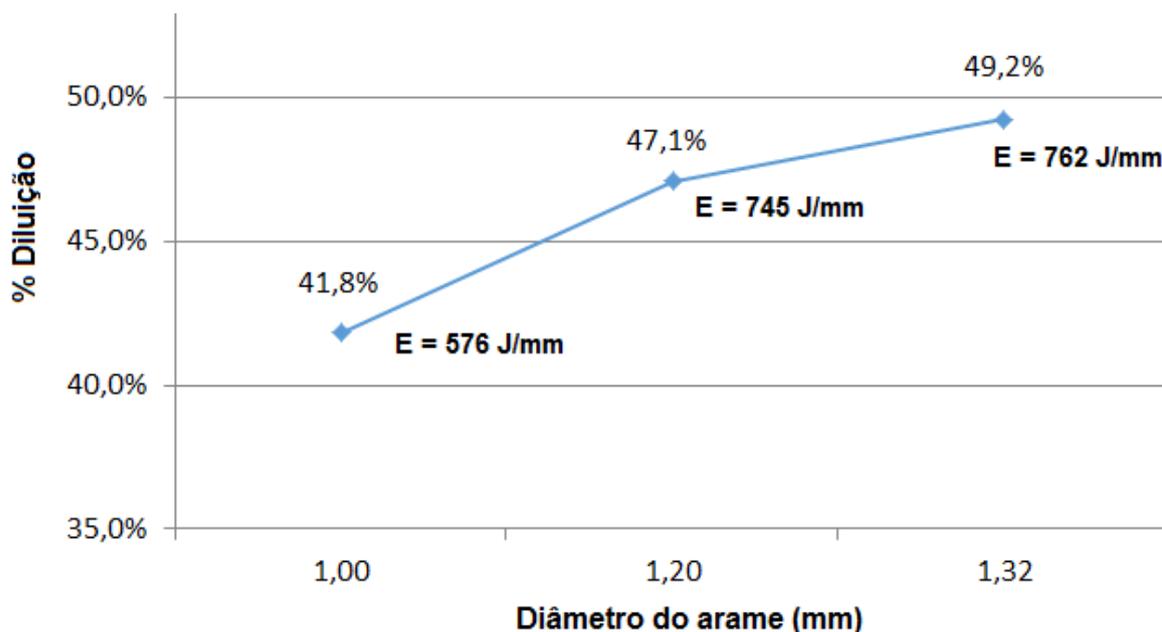


Figura 21: Variação da diluição em função da energia e do diâmetro do arame

#### 4.5 TAXA DE DEPOSIÇÃO DE ARAME

A taxa de deposição de arame é outro fator muito importante para o processo de soldagem GMAW, pois está diretamente relacionada com a produtividade da operação. Para determinar a taxa de deposição obtida com cada diâmetro de arame nos corpos de prova fabricados com os parâmetros ideais, as chapas foram pesadas em uma balança de precisão, antes e depois da soldagem, fazendo uma relação com o tempo de arco aberto, que foi medido com auxílio de um cronômetro. Para fins de cálculos, não foram consideradas as perdas de metal de adição que ocorrem durante a transferência devido a salpicos, pois a sua incidência foi muito pequena.

As taxas de deposição obtidas em cada situação estão apresentadas na Figura 22, onde se pode verificar que a melhor taxa obtida foi com o arame com diâmetro de 1,32 mm, sendo que se comparado com a taxa de deposição obtida com o arame de 1,0 mm, esta apresentou um aumento de 24,3%, ou seja, com o maior diâmetro será possível depositar 1,91 kg de arame a mais por hora de arco aberto, o que representa um ganho considerável em questões de produtividade.

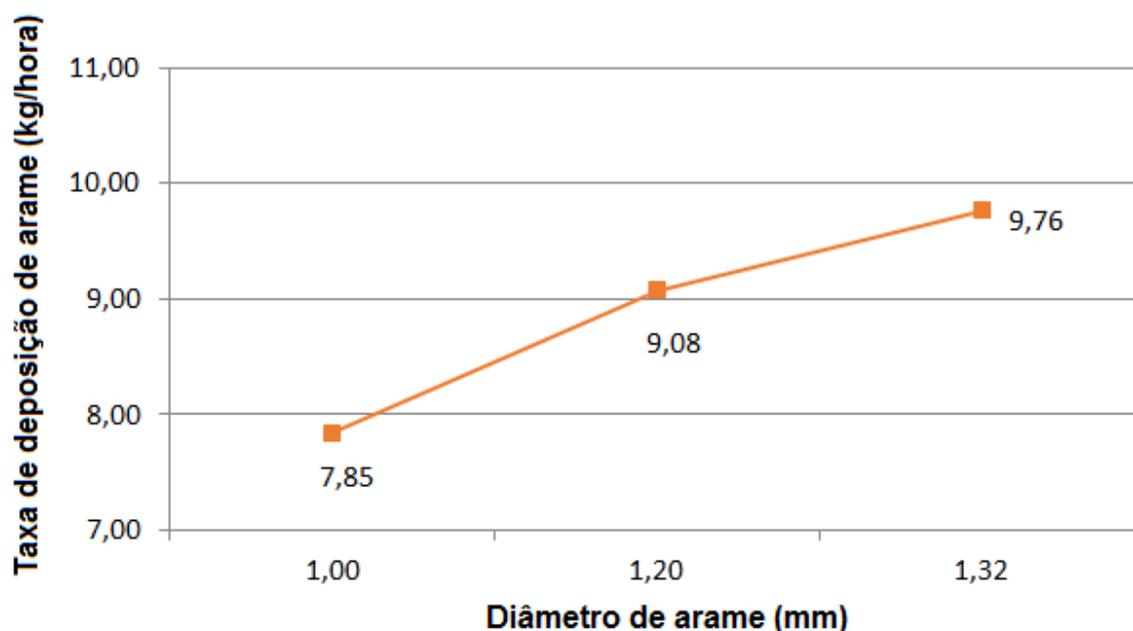


Figura 22: Variação da taxa de deposição em função do diâmetro do arame

#### 4.6 CUSTOS DE SOLDAGEM

Marques, Modenesi e Bracarense (2011), mostraram que é possível estimar o custo final de um processo de soldagem qualquer através da soma dos custos de mão de obra, consumíveis, energia elétrica, manutenção, depreciação e ainda de outros materiais de consumo. Com base nos objetivos deste trabalho, foram calculados apenas os custos com metal de adição, gás de proteção e com energia elétrica, considerando a fabricação de um cordão de solda com um metro de comprimento, produzido através da aplicação dos parâmetros ideais obtidos para cada diâmetro de arame, sendo que os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10

Custos de soldagem por metro de solda com diferentes diâmetros de arame

Custos (R\$)	Diâmetro do Arame (mm)		
	1,00	1,20	1,32
Metal de Adição	R\$ 0,262	R\$ 0,243	R\$ 0,229
Gás de Proteção	R\$ 0,609	R\$ 0,455	R\$ 0,393
Energia Elétrica	R\$ 0,153	R\$ 0,199	R\$ 0,211
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 1,024</b>	<b>R\$ 0,897</b>	<b>R\$ 0,833</b>

A Figura 23 mostra cada fator de custo relacionado ao diâmetro de arame aplicado, baseando-se na fabricação de um metro de solda. É possível verificar que o custo com gás de proteção foi o que exerceu maior influência dentre os demais custos analisados, sendo que este decresceu com a utilização de maiores diâmetros de arame. Isto se deve ao fato de que com o aumento no diâmetro do arame, foram aplicadas maiores velocidades de soldagem, resultando em um consumo de gás relativamente menor, pois a vazão foi mantida constante.

Referente ao custo com metal de adição, ou seja, arame, o consumo para efetuar um metro de solda se manteve constante para os três diâmetros pois a geometria do cordão foi a mesma, contudo o custo apresentou-se menor para os maiores diâmetros, devido a variação no valor de compra pago pela empresa, ou seja, quanto menor for o diâmetro do arame, maior é o preço pago por quilo (kg). Assim, o arame com diâmetro de 1,32 mm apresentou o menor custo com metal de adição.

Já o custo com energia elétrica apresentou uma relação contrária dos demais fatores analisados, pois este aumentou com a utilização de maiores diâmetros de arame, devido ao fato de que a tensão e a intensidade de corrente aplicadas para a obtenção do cordão desejado foram maiores, considerando um rendimento elétrico da fonte de soldagem de 70%. Contudo, este fator de custo foi o que apresentou a menor influência sobre o custo total calculado.

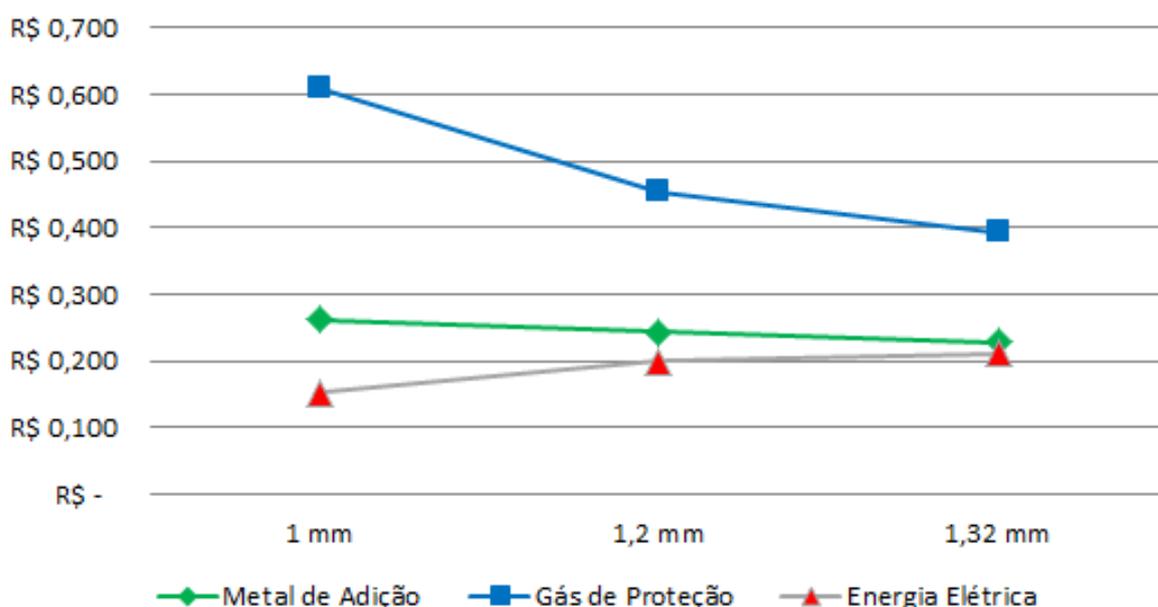


Figura 23: Custos de soldagem em função do diâmetro do arame

## 5. CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos para este trabalho e tendo como base os procedimentos adotados, resultados obtidos e suas respectivas análises, puderam-se estabelecer as seguintes conclusões:

- Variações no diâmetro do arame exigem diferentes níveis de corrente, tensão e velocidade de soldagem, para que seja obtida a mesma geometria do cordão de solda. Contudo, em relação às condições aqui analisadas, dentre estes três fatores, o parâmetro que influenciou estatisticamente sobre a largura do cordão depositado foi a velocidade de soldagem, com um índice de confiabilidade de 95%.

- A metodologia Taguchi aplicada na elaboração e análise dos experimentos proporcionou uma interação entre os parâmetros de entrada e seus respectivos níveis, indicando através da razão sinal-ruído, os melhores parâmetros a serem utilizados com cada diâmetro de arame, ou seja, os parâmetros mais favoráveis à obtenção do cordão de solda conforme as especificações aqui determinadas.

- A taxa de diluição da solda foi diretamente influenciada pela energia de soldagem aplicada. Assim, com a utilização de maiores diâmetros de arame, aplicaram-se maiores energias de soldagem, e com isso a diluição do metal depositado na zona fundida aumentou proporcionalmente, sendo que a melhor taxa de diluição foi obtida utilizando o arame com diâmetro de 1,32 mm, a qual resultou em 49,2%.

- A taxa de deposição obtida na soldagem com os parâmetros ideais para o arame de diâmetro de 1,32 mm apresentou um incremento de 24,3% se comparada à taxa de deposição obtida com o diâmetro de 1,0 mm e um incremento de 7,5% se comparada à taxa obtida com o diâmetro de 1,2 mm. Considerando que este fator está diretamente relacionado com a produtividade de qualquer operação de soldagem, a aplicação do arame com diâmetro de 1,32 mm, nas condições experimentais, mostrou-se a melhor, pois foi possível depositar maior quantidade de metal por unidade de tempo.

- Com base nos valores disponibilizados pela empresa concedente dos materiais e equipamentos, pode-se afirmar que quanto maior for o diâmetro do arame, menor será o custo para a fabricação de um determinado cordão de solda, levando em consideração os três fatores de custo analisados neste trabalho, sendo que o

arame com diâmetro de 1,32 mm apresentou um custo de 18,6% menor em relação ao custo para a soldagem com o arame com diâmetro de 1,0 mm e 12,4% menor em relação ao arame com diâmetro de 1,2 mm. Isto se deve ao fato de que com maiores diâmetros de arame é possível aplicar maiores velocidades de soldagem, reduzindo assim o consumo de gás de proteção, e também, ao fato de que o valor pago pelo quilo de arame decresce com o aumento do seu diâmetro. Quanto ao custo com energia elétrica, este apresentou uma relação contrária, sendo que para os maiores diâmetros de arame, o consumo aumentou devido a maiores níveis de tensão e corrente aplicados ao processo.

- A utilização do arame com diâmetro de 1,32 mm mostrou-se, dentre os demais diâmetros analisados, o ideal para a soldagem nas condições aplicadas, pois este resultou na melhor taxa de deposição e de diluição, gerando ainda o menor custo, sem ocasionar descontinuidades na solda.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, V. J. **Desenvolvimento de envelopes operacionais para processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Processos de Fabricação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- ANDRADE, A. C. **Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- ASM HANDBOOK, VOL. 6. **Welding, Brazing and Soldering.** American Society for Metals: Holliday, D. B. Westinghouse Electric Corporation, 1993.
- AWS A5.18. **Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding.** American Welding Society, Miami, USA.
- AWS D1.1. **Structural Welding Code – Steel.** 22. ed. International Standard Book Number: 978-0-87171-772-6. American Welding Society, Miami, USA, 2010.
- BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados.** Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- CAYO, E. H. **Modelagem e controle da soldagem orbital através do processo GMAW-S.** 2013. Tese (Doutorado em sistemas mecatrônicos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 2004.
- CORREIA, E. S.; CARDOZA, J. S. **Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi.** XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Florianópolis, 2004.
- CRUZ, J. A. **Uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo GMAW.** Dissertação (Mestrado em sistemas mecatrônicos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- FIGUEIREDO, K. M. F. **Tecnologia da soldagem.** 2005. Relatório técnico de soldagem – Centro federal de educação tecnológica do Maranhão, São Luís, 2005.
- FISCHER, A. **Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW – Arco pulsado.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica / Processos de Fabricação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- FORTES, C. **Apostila de Soldagem MIG/MAG.** São Paulo: ESAB Soldagem e Corte, 2005.
- KIM, I. S. **Numerical and experimental analysis for the GMAW process.** Doctor of Philosophy thesis. Department of Mechanical Engineering - University of Wollongong, Wollongong, Australia, 1995.
- KOBE STEEL. **KOBELCO Welding Handbook.** Welding Business Marketing Department, Kobe Steel, Ltd, 2014.
- MACHADO, I. G. **Condução de calor na soldagem: Fundamentos e aplicações.** Ed. Pelo autor e distribuído pela Associação Brasileira de Soldagem (ABS). Porto Alegre, 2000.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos.** Ed. Pelo autor e distribuído pela Associação Brasileira de Soldagem (ABS). Porto Alegre, 1996.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia.** 11. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MODENESI, P. J. **Fontes de energia para a soldagem a arco**. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. (Apostila)

NADZAM, J.; et. al. . **Gas Metal Arc Welding Guidelines**. The Lincoln Electric Company, Cleveland, USA, 2011. (Manual técnico)

PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BOLMSJÖ, G. **Welding robots: technology, system issues and applications**. Springer. London. 2006.

QUITES, A. **Terminologia das imperfeições da soldagem**. Florianópolis: Soldasoft, 2011.

WAINER E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2004.