



Gerson Vandr  Kuhn

**DEFINIÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE
SOLDAGEM PARA OBTER ALTO RENDIMENTO EM UM
PROCESSO MAG CONFIGURADO EM TANDEM**

Horizontina

2014

Gerson Vandre Kuhn

**DEFINIÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE
SOLDAGEM PARA OBTER ALTO RENDIMENTO EM UM
PROCESSO MAG CONFIGURADO EM TANDEM**

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.

CO-ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Doutor.

Horizontina

2014

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

“ Determinação dos melhores parâmetros de soldagem para obter alto rendimento em um processo MAG configurado em Tandem.”

Elaborada por:

Gerson Vandré Kuhn

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

**Aprovado em: 13/11/14
Pela Comissão Examinadora**

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

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

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

Horizontina

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho e conquista.

Aos professores que me ajudaram e me incentivaram durante esta jornada, especialmente aos professores Valtair Alves e Richard Lermen pelo suporte e pela orientação na elaboração deste trabalho.

A minha esposa Claudia por me apoiar e por segurar a barra quando nossa filha nasceu.

À empresa John Deere Brasil por permitir a realização deste trabalho em suas dependências.

E, por fim, a todos meus colegas que de alguma forma me auxiliaram durante esta jornada muito importante na minha vida.

"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo, fará coisas admiráveis."

José de Alencar

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a determinação dos melhores parâmetros de soldagem para um processo MAG (*Metal Active Gas*) utilizando o método Tandem, bem como analisar qual a influência de cada parâmetro sobre a geometria do cordão, a taxa de deposição do metal de solda e a qualidade da junta soldada. Este processo consiste em realizar soldas utilizando dois fios de metal de adição em uma mesma poça de fusão, sendo que cada fio pode ter potenciais elétricos diferentes. Para o melhor funcionamento do sistema faz-se necessária a automação do processo de soldagem, já que o mesmo exige precisão para funcionar corretamente, bem como, total domínio e conhecimento por parte de seus executores. A grande vantagem deste processo é a produtividade, pois adicionando mais material na poça, tem-se a possibilidade de aumentar a velocidade de soldagem. Os testes foram realizados por meio da soldagem de corpos de prova constituídos de aço carbono SAE 1020 de 6 mm de espessura em uma junta em ângulo do tipo "T", utilizando para tal, um sistema com dois robôs trabalhando, simultaneamente, simulando uma tocha acoplada de um processo Tandem. Os parâmetros de entrada analisados foram: a tensão, a velocidade de alimentação e a velocidade de deslocamento. Já os critérios de saída analisados constituíram-se em: a taxa de deposição de arame, a penetração, o tamanho da garganta efetiva e o tamanho das pernas do cordão de solda. Para análise dos resultados, os corpos de prova foram pesados antes e depois da soldagem para determinação da taxa de deposição e posteriormente preparados no laboratório para a verificação dos demais critérios citados anteriormente. O método Taguchi foi utilizado para a realização da análise estatística dos resultados, buscando encontrar a relação dos resultados de saída com os parâmetros utilizados. Isso permitiu identificar os parâmetros com maior influência sobre os critérios analisados, bem como, permitiu a definição dos parâmetros para o atingimento dos melhores resultados em solda Tandem.

Palavras-chave: Soldagem MAG - Processo Tandem MAG/MAG - Metodo Taguchi

ABSTRACT

This study aims to determine the best welding parameters for a MAG process (Metal Active Gas) using a Tandem method for high throughput, and analyze what influence of each parameter on the bead geometry, the deposition rate of weld metal and the quality of the welded joint. This process consists in performing welding using two wire strands in the same weld pool, and each wire strand can have different electric potentials. For optimum operation of the system is necessary automation of the welding process, since it requires some precision to function properly, as well as total control and knowledge by of its performers. The great advantage of this process is productivity, because adding more material in the puddle, we are able to increase the welding speed. The tests were performed by means of welding specimens made of carbon steel SAE 1020 of 6 mm thick at a joint angle of type "T", using such a system with two robots working simultaneously simulating a torch coupled to a process Tandem. The input parameters were analyzed: the voltage, wire feed speed and travel speed. Already exit criteria analyzed were found to be: the deposition rate wire penetration, the size of the effective throat size and the legs of the weld bead. For data analysis, the specimens were weighed before and after welding to determine the deposition rate and subsequently prepared in the laboratory to verify the other criteria mentioned above. The Taguchi method was used for the statistical analysis of the results, seeking to find the ratio of output results with the parameters used. This allowed us to identify the parameters with the greatest influence on the criteria analyzed as well, allowed to define the parameters for achieving the best results in welding Tandem.

Keywords: MAG welding - Tandem process MAG/MAG - Taguchi Metod

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Soldagem MAG	04
Figura 2 - Equipamento básico para a soldagem MAG.....	06
Figura 3 - Configuração dos processos Twin arc (A) e Tandem (B).....	15
Figura 4 - Tocha de único potencial.....	16
Figura 5 - Tocha com potencial isolado.....	17
Figura 6 - Robô Motoman, Fonte de solda Muller.....	22
Figura 7 - Dispositivo de solda.....	23
Figura 8 - Critérios analisados.....	24
Figura 9 - Posição de soldagem das tochas.....	25
Figura 10 - (a) Soldagem dos corpos de prova e (b) seções das amostras.....	27
Figura 11 - Software usado na coleta de dados.....	28
Figura 12 - Taxa de deposição em função da Velocidade de alimentação.....	30
Figura 13 - Taxa de deposição em função da tensão.....	31
Figura 14 - Taxa de deposição em função da velocidade de deslocamento.....	31
Figura 15 - Razão S/N para os parâmetros analisados.....	32
Figura 16 - Tamanho das pernas em função da velocidade de alimentação.....	34
Figura 17 - Tamanho das pernas em função da tensão.....	34
Figura 18 - Tamanho das pernas em função da velocidade de deslocamento.....	35
Figura 19 - Razão S/N para os parâmetros analisados.....	36
Figura 20 - Medida das pernas do corpo de prova.....	36
Figura 21 - Garganta efetiva em função da velocidade de alimentação.....	37
Figura 22 - Garganta efetiva em função da tensão.....	38
Figura 23 - Garganta efetiva em função da velocidade de deslocamento.....	38
Figura 24 - Razão S/N para os parâmetros analisados.....	39
Figura 25 - Medida da garganta efetiva do corpo de prova.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Perfis desejáveis e aceitáveis em solda em ângulo.....	18
Quadro 2 - Parâmetros de soldagem.....	25
Quadro 3 - Variação dos parâmetros para cada corpo de prova.....	26
Quadro 4 - Respostas dos testes experimentais.....	29
Quadro 5 - Estudo da Variância para a Taxa de deposição de arame.....	30
Quadro 6 - Estudo da variância para o tamanho médio das pernas.....	33
Quadro 7 - Estudo da variância para o tamanho da garganta efetiva.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1 JUSTIFICATIVA.....	02
1.2 OBJETIVOS.....	02
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	04
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG.....	04
2.2 EQUIPAMENTOS.....	05
2.2.1 Fonte de potência.....	06
2.2.2 Alimentador de consumível.....	07
2.2.3 Tocha.....	07
2.2.4 Conduítes e cabos.....	08
2.3 ARCO ELÉTRICO.....	08
2.4 TRANSFERÊNCIA METÁLICA MAG.....	08
2.4.3 Transferência por corrente pulsada.....	09
2.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	09
2.6.1 Taxa de deposição de arame.....	11
2.6.2 Velocidade de deslocamento.....	11
2.6.3 Velocidade de alimentação de arame.....	12
2.7 GÁS DE PROTEÇÃO.....	12
2.8 AUTOMAÇÃO EM SOLDAGEM MAG.....	12
2.8.1 Soldagem MAG robotizada.....	13
2.9 SOLDAGEM MAG DE ALTO RENDIMENTO.....	14
2.9.1 Processo com único potencial (Twin arc).....	15
2.9.2 Processo com potencial isolado (Tandem arc).....	16
2.10 CRITÉRIOS DE QUALIDADE EM SOLDAGEM.....	17
2.10.1 Geometria do cordão.	18
2.10.2 Defeitos de continuidade nos cordões..	19

2.11 METODOLOGIA TAGUCHI	20
3. METODOLOGIA	22
3.1 MATERIAIS.....	22
3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS.....	24
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	28
4.1 TAXA DE DEPOSIÇÃO DE ARAME.....	30
4.2 PERNAS	33
4.3 GARGANTA EFETIVA.....	37
5 CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de soldagem, o processo MAG se revelou nos últimos anos, como o de maior utilização e crescimento nas indústrias, isso porque apresenta alta produtividade, qualidade nos cordões de solda, fácil operação e grandes possibilidades para automação. A transferência do metal de adição neste processo pode ser realizada por curto circuito, globular, aerosol ou pulsada, produzindo uma poça de fusão no local do contato entre consumível e a peça, sendo que esta apresenta um resfriamento relativamente rápido, proporcionando a soldagem de chapas finas e grossas, passes de raiz e soldagens fora de posição.

Nos últimos anos, a demanda por processos que garantam a qualidade e que, simultaneamente, possam aumentar a produtividade está aumentando. Este fato estimula o desenvolvimento de processos de soldagem de alto desempenho, nos quais se busca o aumento da taxa de deposição de metal de adição. Estes métodos podem atingir uma velocidade de deposição maior de 15 kg / h, no caso de aços. Esta maior taxa de deposição pode ser convertida em maiores secções transversais do cordão ou, em maiores velocidades de soldagem. Existem duas formas de conseguir taxas de deposição mais altas, uma delas é aumentar a área da secção do fio do metal de adição e, a outra; é utilizar mais de um fio ao mesmo tempo. Este processo é chamado de duplo arame, que consiste em colocar dois fios de metal de adição soldando simultaneamente, sendo que este é o assunto do presente trabalho.

Quando dois fios de metal de adição são utilizados simultaneamente, duas configurações são possíveis. Uma é o processo *Time twin*, onde os fios passam em conjunto pelo mesmo tubo de contato, com isso, ambos os fios terão os mesmos parâmetros de ajuste de potencial elétrico, e a outra é o processo Tandem, em que cada fio é conduzido por um tubo de contato separado, isolados um do outro, tornando possível que os dois tenham parâmetros de ajuste diferentes um do outro.

Nos processos de alto rendimento, como o Tandem, não é somente uma questão do aumento da velocidade de soldagem ou do aumento da taxa de deposição do metal de adição, pois a alta produtividade exige perfeição e precisão do processo. Estes processos exigem muito do sistema: uma alta disponibilidade dos equipamentos, um processo estável, um trabalho preciso, confiabilidade,

robustez, só para mencionar algumas características, sendo que estas condições básicas devem funcionar perfeitamente sincronizadas.

Segundo Weman (2003), a definição da velocidade de alimentação do arame e da tensão de soldagem pode ser muito mais complicada quando os dois fios de metal de adição são utilizados simultaneamente, em particular na soldagem em Tandem, uma vez que é necessário definir os parâmetros de soldagem separadamente para cada fio. Outro fator a ser considerado é o efeito magnético que aparece sobre as gotas que formam a poça de fusão, como os dois fios ficam bem próximos um do outro, podem acontecer sopros ou golpes magnéticos que coincidem com os pulsos das fontes de soldagem.

1.1 JUSTIFICATIVA

É crescente a procura por processos de soldagem que garantam uma excelente qualidade de soldagem juntamente com um aumento da produtividade e uma diminuição nos custos. Esta exigência leva ao desenvolvimento de processos de soldagem de alto desempenho com aumento da taxa de deposição. As empresas querem converter a taxa de deposição superior, ou em uma seção transversal maior do cordão de solda, ou em uma velocidade de soldagem superior. Com métodos de soldagem de alta performance a taxa de deposição e a velocidade de soldagem podem ser aumentadas, aproximadamente, três vezes. Justifica-se este trabalho, pela relevância da soldagem nos processos de fabricação e pelo fato de que o mesmo poderá contribuir com informações importantes para empresas que através do processo Tandem pretendem incrementar seus índices de produtividade sem perder em qualidade, podendo assim, oferecer produtos mais baratos e manterem-se competitivas no mercado atual.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é determinar quais são os melhores parâmetros de soldagem para obter alto rendimento utilizando um processo MAG configurado em Tandem, bem como determinar a relação dos mesmos sobre os critérios de qualidade para juntas soldadas. Baseados no objetivo principal apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar cordões de solda em juntas do tipo T, utilizando corpos de prova de aço SAE 1020 com 6 mm de espessura.

- Pesquisar os corpos de prova antes e depois da soldagem, fazendo uma relação com o tempo de soldagem para determinar a taxa de deposição do arame.

- Criar um projeto experimental variando os parâmetros de soldagem como: tensão, velocidade de alimentação e velocidade de deslocamento, a fim de encontrar os melhores parâmetros em soldagem para obtenção de um filete de solda com pernas de 6 mm.

- Fazer análise metalográfica da seção transversal dos corpos de prova, avaliando os critérios de qualidade como: penetração, garganta efetiva e tamanho das pernas.

- Analisar como os parâmetros de solda influenciam nos critérios anteriormente citados.

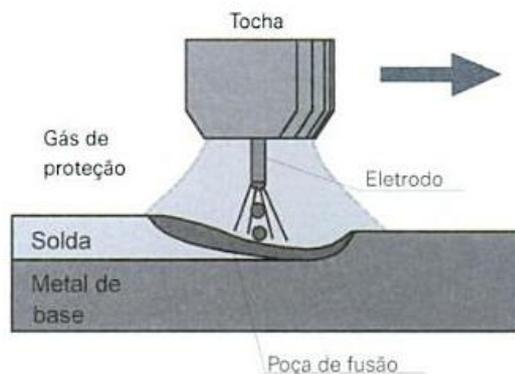
2 REVISÃO DA LITERATURA

Este referencial teórico descreve os fundamentos referentes à soldagem MAG, automação em soldagem, e aplicações em soldagem de alto rendimento tal como o processo Tandem.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG

Segundo Liao e Chen, (1998), o processo MAG é um dos mais utilizados nas indústrias por apresentar bons índices de produtividade e qualidade, bem como, podendo ser executado com custo relativamente baixo. O processo de soldagem a arco gás metal (MAG) permite a união de dois ou mais metais pelo aquecimento produzido por um arco elétrico entre um eletrodo metálico e a peça, usando um gás para proteger a poça de fusão dos gases da atmosfera como o oxigênio e o nitrogênio. O processo está representado na Figura 1.

Figura 1 – Soldagem MAG



Fonte: Modenesi, Marquez, Bracarense, 2005

Para a soldagem MAG pode-se ter dois processos distintos, que se diferem pelo tipo de gás utilizado como proteção. Um deles é quando o gás é inerte, ou seja, o gás não exerce nenhuma atividade física na poça de fusão. Este gás, normalmente, é monoatômico como o hélio e o argônio. O outro é quando o gás é ativo, ou seja, o mesmo tem alguma interação com a poça de fusão. Neste caso, normalmente é usado o gás CO₂ (dióxido de carbono) e o oxigênio.

Como todo processo de fabricação, o processo MAG apresenta uma série de vantagens e desvantagens. Na sequência segue a lista das vantagens:

- Alta taxa de deposição de material, o que gera alta produtividade;
- Alta versatilidade, permitindo soldagem de um range alto de tipos e espessuras de materiais;
- Baixo custo com relação a outros processos;
- Ausência de escória;
- Grandes possibilidades de automação, tais como a robotização;
- Bom acabamento;
- Boa qualidade da solda;
- Baixa geração de fumos de solda.

A seguir, seguem algumas desvantagens do processo:

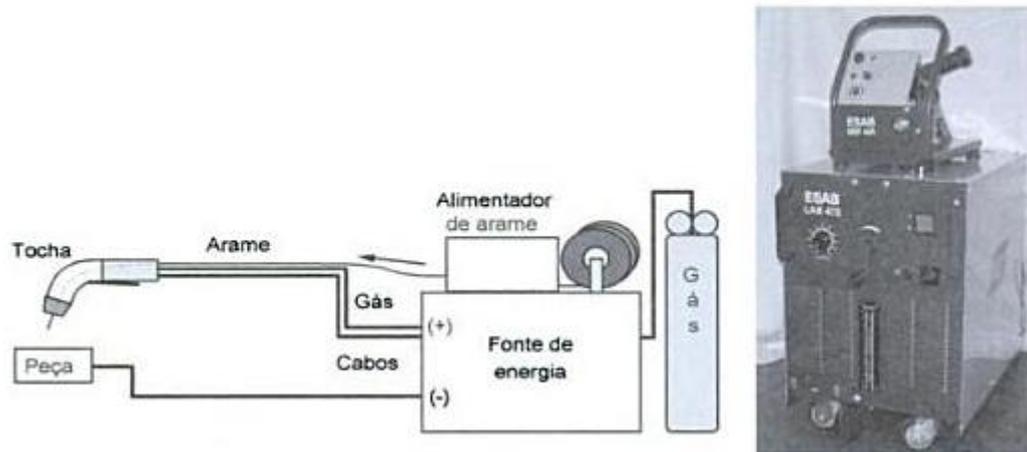
- Parametrização do processo bastante complexa;
- Processo influenciado por correntes de ar;
- Equipamento de soldagem possui um custo elevado em comparação aos demais processos;
- Pouca variedade de consumíveis;
- Processo produz uma quantidade considerável de respingos quando não controlado de forma eficaz;
- Probabilidade de surgimento de porosidades nos cordões de solda;
- Posição de soldagem limitada.

2.2 EQUIPAMENTOS

A soldagem MAG é considerada um processo semiautomático, sendo que, a alimentação do consumível (arame) é feita por meio de um alimentador motorizado, desta forma, o operador é o responsável por conduzir a tocha durante a soldagem, bem como, fazer a ignição e a interrupção do arco conforme necessário durante a execução da solda. O arco elétrico é alimentado continuamente pelo fio de consumível e o comprimento do arco é mantido quase que num valor constante pelo sistema, variando pouco independente dos movimentos feitos pelo soldador durante a soldagem. O arco gera um calor que funde as peças a serem unidas e o arame, usado como metal de adição na junta (MODENESI, 2000).

Para executar uma solda MAG precisa-se de: um alimentador de arame, uma tocha, cabos de energia, cilindro ou uma rede de gás, válvulas redutoras do gás, consumíveis em geral e uma peça. Estes equipamentos podem ser identificados na Figura 2.

Figura 2 - Equipamento básico para a soldagem MAG.



Fonte: Modenesi, Marquez, Bracarense, 2005.

2.2.1 Fonte de potência

De acordo com Brandi (2004), a fonte poderá ser um gerador ou um retificador, porém precisam apresentar características de tensão constante. Essa fonte precisa atender alguns requisitos para que ela seja capaz de suportar um processo de solda MAG. Primeiramente, ela deve transformar a energia vinda da rede que possui baixa corrente e alta tensão, em uma energia de alta corrente e baixa tensão, que são características deste processo de soldagem. Ela deve também permitir que os valores de tensão e corrente sejam ajustados conforme as especificações, bem como, controlar a variação e a forma como os níveis de tensão e corrente variam, de acordo com os parâmetros de soldagem estipulados para a operação.

Uma fonte também deve atender as normas de segurança, a fim de preservar a integridade dos soldadores, bem como apresentar boa resistência, para que a mesma não apresente problemas mediante ao ambiente severo que apresenta uma área de soldagem.

2.2.2 Alimentador de consumível

A principal função do alimentador é puxar o arame do carretel ou da barrica para alimentar o arco elétrico. Este módulo, além de fazer a alimentação do arame, normalmente também tem a função de fazer o controle de soldagem. Este controle basicamente consiste em regular a velocidade de alimentação do arame. Os sinais elétricos advindos da tocha como o de abrir e fechar o arco também chega ao alimentador. No alimentador, o arame passa por entre um conjunto de roletes, forçando-o a seguir pelo conduíte até a tocha. Segundo Modenesi (2000), os roletes são alimentados por um motor de corrente contínua que permite um grande range de ajustes de velocidade. Ao aumentar a velocidade dos roletes e do arame, indiretamente estaremos aumentando a corrente utilizada no processo, devido às características das fontes utilizadas no processo.

2.2.3 Tocha

Para Gimenez (2005), uma tocha para soldagem MAG consiste, basicamente, em um bocal, um bico de contato, e um gatilho. O bocal é uma peça normalmente feita em cobre e serve para orientar o fluxo de gás durante a soldagem. Este deve ter um diâmetro compatível com a solda a ser realizada, tipo quanto maior o diâmetro do consumível, a corrente e a voltagem, maior também deve ser o diâmetro do bocal. O bico de contato serve para fazer a energização do fio de consumível. Este consiste em pequeno tubo feito de cobre com o diâmetro interno um pouco maior que o diâmetro do arame. Já o gatilho serve para fazer o acionamento do alimentador de arame. Este aciona algumas contadoras que, além de acionar o motor do alimentador, também liga o primário da fonte de solda e atua uma válvula solenoide que abre e fecha o fluxo do gás de proteção.

A tocha normalmente sofre algum aquecimento durante a soldagem, principalmente se o regime for severo. Para refrigeração pode ser usado água, ou até o próprio gás de proteção. Referente ao formato, as tochas podem ser curvas ou retas, porém as mais utilizadas são as curvas por facilitarem a empunhadura e o acesso às áreas a serem soldadas.

2.2.4 Conduítes e cabos

A função dos tubos e cabos é basicamente fazer a condução da energia e do gás da fonte até a peça, ou da fonte até o alimentador de arame. Estes devem ter um dimensionamento correto para que não aconteça perda de rendimento durante a soldagem. Os conduítes devem ter uma atenção especial quanto à limpeza e conservação, principalmente na condução do arame de solda, pois o acúmulo de sujeira causa o aumento no atrito interno e, conseqüentemente, fará com que o sistema sofra mais para arrastar o arame até a poça de fusão, prejudicando os componentes do alimentador de arame (ESAB, 2004).

2.3 ARCO ELÉTRICO

Segundo Brandi (2004, p. 9) pode-se definir arco elétrico como:

A descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitida do eletrodo negativo (catodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido. (BRANDI, 2004, p.9)

Vale ressaltar que na soldagem, a descarga do arco elétrico tem tensão baixa e corrente alta. Um arco elétrico forma-se quando dois condutores de corrente elétrica ficam próximos um do outro fazendo o contato elétrico e, em seguida, separado. Com isso, a resistência ao fluxo de corrente aumenta, fazendo com que as temperaturas das pontas dos eletrodos atinjam altos índices.

Os elétrons que vêm do eletrodo negativo colidem com as moléculas e átomos presentes no ar, abrindo-os em íons e elétrons livres e tornando-o um condutor de corrente elétrica devido à ionização. Este fenômeno mantém a corrente através do ar e sustenta o arco. No momento do contato do arame com a peça, a corrente passa no circuito e continua a circular quando o arame é afastado, formando um arco, isso ocorre porque aconteceu a ionização do ar, ou seja, se tornou um condutor de corrente elétrica.

2.4 TRANSFERÊNCIA METÁLICA MAG

Brandi (2004) fala que, em um processo MAG, a transferência metálica acontece, principalmente, em três formas: por curto circuito, globular e por aerosol. Também

nos últimos anos, tem-se trabalhado bastante com a transferência metálica por corrente pulsada. Este tipo vem ganhando muito espaço na indústria por apresentar algumas vantagens sobre os demais. O seguinte tópico possui mais informações sobre este tipo de transferência metálica.

2.4.1 Transferência por corrente pulsada.

Para realizar este tipo de transferência, o equipamento precisa ter os recursos necessários para tal. A fonte, obrigatoriamente, precisa ser do tipo inversor. Este modo de transferência se distingue dos demais, pois o que determina o tamanho da gota é o equipamento de solda. Segundo Bracarense (2005), a transferência acontece por aerosol projetado, que se caracteriza por uma diminuição do diâmetro da gota até o seu estrangulamento na ponta do arame. O arco pulsado apresenta dois níveis de corrente, um mais baixo conhecido como corrente de base, que serve para manter o arco e aquecer o arame, e outro nível mais alto conhecido como corrente de pico, que serve para gerar a energia necessária para destacar a gota do eletrodo e projetá-la através do arco. Praticamente não existem limitações para este modo de transferência, podendo ser aplicado a todas as posições de soldagem, bom como ser usado em todas as espessuras de material. Uma observação a ser feita é referente às misturas dos gases de proteção, deve-se usar uma pequena porcentagem de gás ativo para favorecer a qualidade de soldagem. Outro fato interessante é a ausência de respingos de solda neste processo.

2.6 PARAMETROS DE SOLDAGEM

A geometria do cordão de solda é diretamente influenciada pelos parâmetros de soldagem. Suas propriedades mecânicas, a qualidade, os defeitos operacionais, a estabilidade do arco e o custo operacional estão ligados aos parâmetros de solda. Estes podem ser classificados como variáveis ajustáveis primárias e variáveis ajustáveis secundárias. Nas variáveis primárias, pode-se fazer os ajustes como intensidade de tensão e corrente e a velocidade de soldagem. Já nas variáveis secundárias, tem-se a distância do bico de contato até o metal de base, e também o ângulo de deslocamento da tocha durante a soldagem.

Mas também existem as variáveis chamadas pré-selecionadas, que são o tipo e o diâmetro do consumível, o tipo de metal de base, o tipo de junta adotada e

também o tipo e a vazão do gás de proteção. Estas são chamadas de pré-selecionadas, pois não podem ser modificadas durante a soldagem.

Durante a execução da solda, o soldador precisa controlar alguns fatores que influenciam a geometria final do cordão, bem como, as condições gerais de operação e mais outras características do processo. Um soldador capacitado procura, automaticamente, ajustar todos os fatores a fim de manter o processo operando corretamente.

Arames com diâmetros maiores suportam maiores índices de corrente, como consequência, permitem maiores penetrações e maiores taxas de fusão. Portanto, devemos escolher o diâmetro do consumível de acordo com a penetração desejada, da espessura do metal de base, da taxa de deposição do metal de adição, posição e da geometria final do cordão de solda.

Depois de definidas as variáveis pré-selecionadas, pode-se partir para a escolha dos parâmetros de soldagem, mais precisamente as variáveis ajustáveis primárias. Os valores de correntes influenciam no modo de transferência, na taxa de deposição e na penetração de solda. Em fontes de energia com curva de tensão constante, o ajuste da corrente acontece através da velocidade de alimentação do consumível, ou seja, quanto maior a velocidade, maior os níveis de corrente.

A tensão influencia diretamente na largura do cordão de solda e também no modo de transferência do metal. Nas fontes de energia com tensão constante, a tensão é definida em função no nível de corrente, a fim de estabilizar o arco elétrico. Outros fatores como o tipo de arame e o tipo de gás também podem ser determinantes na seleção da voltagem. Uma seleção equivocada da tensão pode gerar defeitos nos cordões de solda. Uma tensão muito baixa pode causar porosidades e sobreposição de metal nas laterais do cordão. Já uma tensão muito alta, também pode gerar porosidade, bem como respingos e mordeduras.

Depois de selecionados as variáveis primárias, tem-se as variáveis secundárias que podem ser ajustadas durante o processo, a distância do bico até a peça e o ângulo da tocha são exemplos de variáveis secundárias. Segundo Machado (1996) o resultado destas variáveis não tem como ser previsto, o que pode-se obter são apenas tendências. Além do mais, as ajustáveis primárias costumam ser influenciadas pelas secundárias.

Ao aumentar a distancia do bico até a peça, provoca-se um superaquecimento no arame e uma queda na tensão, provocando uma maior taxa de deposição e menores índices de penetração.

O ângulo em que se realiza o deslocamento da tocha influencia na penetração do cordão de solda. Quando posicioa-se a tocha de maneira a atacar penetração e um cordão mais plano e largo. Mudando o sentido da tocha, ou seja, puxando a mesma, acontece um aumento na penetração, bem como um cordão mais alto e estreito. Não são recomendados ângulos de inclinação maiores do que 25°, pois poderão causar sobreposição de metal nas laterais do cordão de solda e podem permitir a entrada de ar atmosférico na região do arco elétrico.

2.6.1 Taxa de deposição de arame

Para Alves (2009), a taxa de deposição de arame é a relação entre a massa final e a massa inicial de uma peça soldada com o tempo de arco aberto que levou para soldar a peça. A unidade de medida desta taxa é dada em kg por hora. A Equação 1 mostra esta relação.

$$\text{Taxa de deposição } \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) = \frac{(\text{Massa final} - \text{Massa inicial})(\text{kg})}{\text{Tempo de arco aberto (h)}} \quad (1)$$

2.6.2 Velocidade de deslocamento

A velocidade de deslocamento é uma relação entre a distância percorrida pela tocha em certa unidade de tempo como, por exemplo: mm/s, cm/min ou m/min. De acordo com Groetelaars (2005) a escolha da velocidade de solda tem influência na taxa de deposição de arame e na geometria do cordão. Quando deseja-se altos níveis de produção, pode-se utilizar altas velocidades de solda, porém é importante ficarmos atentos aos limites, pois se ultrapassados, podem surgir defeitos como trincas ou falta de fusão.

2.6.3 Velocidade de alimentação de arame.

Velocidade de alimentação de arame é a relação entre a velocidade que o arame é fornecido pelo alimentador de arame em certa unidade de tempo, por exemplo: m/min. Segundo Alves (2009), esta é a variável que controla a corrente durante a soldagem, sendo que esta relação é linear. Quando deixa-se os outros parâmetros constantes, e aumenta-se a velocidade de alimentação, uma maior quantidade de arame terá que ser fundida, ou seja, a fonte fornecerá uma maior quantidade de corrente para manter a mesma voltagem.

2.7 GÁS DE PROTEÇÃO

Gimenes (2005), diz que a escolha do gás de proteção irá influenciar várias características do processo de soldagem, são elas: O modo de transferência metálica, propriedades do cordão de solda, geometria do cordão, aparência, estabilidade do arco, velocidade de soldagem e custo final de operação. A vazão do gás deve apresentar um fluxo laminar, sendo que se o fluxo for turbulento, podem aparecer defeitos nos cordões de solda devido à contaminação que pode ocorrer na poça de fusão em decorrência dos gases da atmosfera. Para os processos com gás inerte, o Argônio é o mais utilizado, e para os processos com gás ativo, o dióxido de carbono é o mais utilizado. Também dependendo da geometria do cordão desejado, pode-se usar uma mistura de gases inertes e ativos para atingir o objetivo.

2.8 AUTOMAÇÃO EM SOLDAGEM MAG

Atualmente, na indústria existem alguns fatores que forçam a automação dos processos de solda. Para Alves (2009), a necessidade de aumentar os índices de produtividade, a escassez de trabalho qualificado e o aumento das exigências de segurança no trabalho são fatores que elevam a demanda por processos automatizados.

A automação nos processos de soldagem a arco pode ser aplicada em uma série de níveis, desde o mais simples ao mais altamente sofisticado. Equipamentos de solda MAG foram originalmente classificados em semiautomáticos, que são os mais comuns, com a alimentação mecanizada de arame, e o processo automático,

que é quando, além da alimentação do arame, o deslocamento da peça em relação à tocha também é mecanizado.

A introdução de robôs nos processos de solda ofereceu um nível adicional de controle. Este permite controle dos comandos mais básicos como abrir e interromper o arco até os controles mais complexos, como as trajetórias da tocha de solda ou até mesmo da peça quando também usa-se posicionadores automatizados. Essas informações são fornecidas para a máquina através de um programa de solda, no qual são gravados as trajetórias e os pontos de abertura e fechamento de arco. Parâmetros como tensão, corrente, velocidade do arame e velocidade de deslocamento também são programados, podendo até mesmo variar de cordão para cordão.

Soldagem automatizada pode melhorar a produtividade, a qualidade e as condições de trabalho. Mas em muitas situações, a automação pode ser necessária ou obrigatória. Um exemplo disto é a utilização de robôs para efetuar soldagem em locais com muita contaminação do ar ou em ambientes com índices de radiação, como nas usinas.

2.8.1 Soldagem MAG robotizada

De acordo com Modenesi (2011), um robô industrial é constituído por elos conectados e articulados, sendo que em um dos elos, normalmente o primeiro, é vinculado a uma base fixa, e no último elo é vinculada a ferramenta, que no caso da solda é uma tocha de soldagem. Desta forma, o deslocamento da tocha é controlado segundo as trajetórias que formam especificadas durante a programação do robô. Os tipos de robôs mais utilizados na área de soldagem são:

1. Robô de configuração Linear (cartesiano): Estes movem a tocha dentro de uma área de trabalho retangular (X, Y e Z) e são comumente usados em cordões lineares.
2. Robô tipo Cilíndrico: Este é similar ao retangular, pois utiliza moimentos deslizantes em duas direções (X e Z), mas com uma junta em rotação, resultando em uma área de trabalho cilíndrica.
3. Robô tipo Esférico: Este tipo possui um eixo deslizante e dois rotativos. Esta configuração transforma a sua área de trabalho em uma esfera.

4. Robô tipo Articulado: Este tipo tem todos os eixos com movimentos de rotação. É comum apresentarem seis eixos, o que torna a área de trabalho mais completa e flexível. Isso habilita este robô a realizar qualquer tipo de soldagem, desde uma soldagem linear até uma soldagem fora de posição.

Além do robô de solda, uma célula MAG robotizada precisa ter mais alguns equipamentos para entrar em operação, ou seja, é preciso um controlador computacional do robô, uma fonte de energia, um alimentador de arame acoplado ao robô e todos os acessórios necessários para realizar a solda, tais como: a tocha, cabos, equipamentos de limpeza, sistemas de segurança, etc.

Quanto à programação, os robôs de solda podem ser programados de duas maneiras. A primeira é o modo '*on line*', em que a programação é feita diretamente no robô. O programador passa com o robô nos pontos a serem soldados e vai gravando as trajetórias no CLP da máquina, em seguida, é só chamar o programa e soldar. E a segunda é o sistema '*off line*' em que a programação é feita fora da célula de trabalho. Essa programação pode ser feita por meio de um sistema de coordenadas, ou também por *softwares* que simulam a interface do robô. Feita a programação, o programa é descarregado no CLP do robô e testado. Para aplicações de soldagem, a maioria opta pelo método *on line*, porque este permite modificações nas variáveis primárias conforme surge a necessidade durante o processo de programação.

2.9 SOLDAGEM MAG DE ALTO RENDIMENTO

Falando-se em processos de soldagem de alto rendimento, basicamente fala-se em aumentar a velocidade de soldagem e a taxa de deposição de arame. Mas para atingir tais objetivos, precisa-se que todos os equipamentos e dispositivos estejam funcionando perfeitamente. O processo de alto rendimento exige muito do processo de soldagem, é preciso alta disponibilidade de equipamentos, estabilidade no processo, precisão, robustez, e confiabilidade para uma longa vida útil.

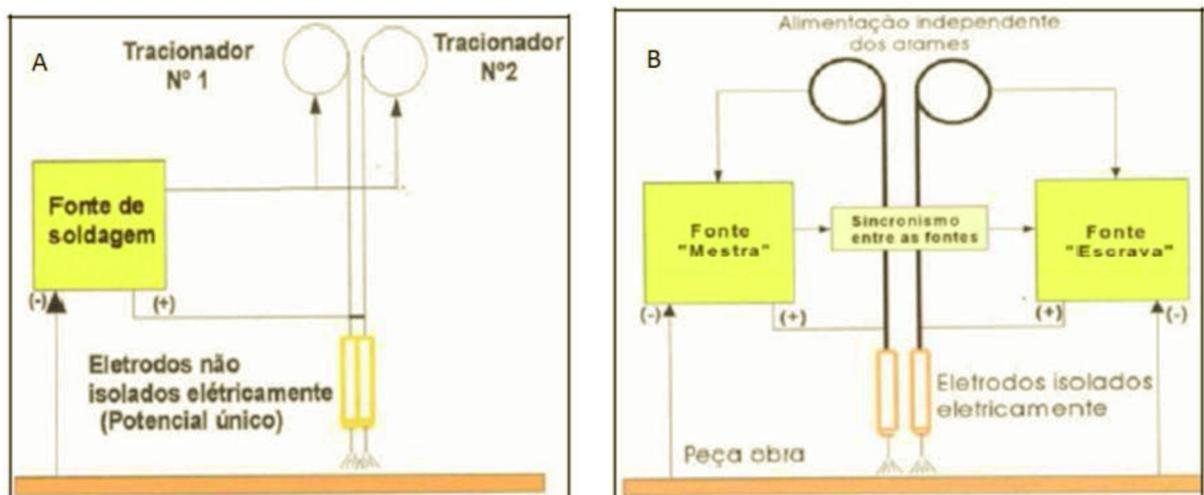
Podem-se utilizar processos de soldagem de alto rendimento em várias aplicações. Os processos podem ser aplicados tanto para chapas finas, bem como para chapas mais espessas, ou para aços convencionais ou aços inox e alumínio.

Estão em processo de desenvolvimento em fase mais avançada quatro

métodos de soldagem de alto rendimento, são eles: Laser híbrida, duplo arame, soldagem com fio plano, e soldagem com arames de grandes diâmetros.

O processo de solda MAG com duplo arame é uma variação do processo de solda MAG convencional, cujo objetivo é aumentar a produtividade. A principal diferença entre o processo convencional e o processo com duplo arame é a utilização de dois fios de arame, podendo formar uma única poça de fusão, ou também podendo formar poças separadas. Groetelaars (2005), afirma que neste processo, a energização do arame pode ser de duas maneiras distintas, uma utilizando o mesmo bico de contato e, conseqüentemente, o mesmo potencial elétrico (*twin arc*), e outra, utilizando dois bicos de contato isolados, com duas fontes e diferentes potenciais elétricos (*Tandem arc*). A Figura 3 mostra as distintas configurações.

Figura 3: Configuração dos processos *Twin arc* (A) e *Tandem* (B)



Fonte: Groetelaars, 2005

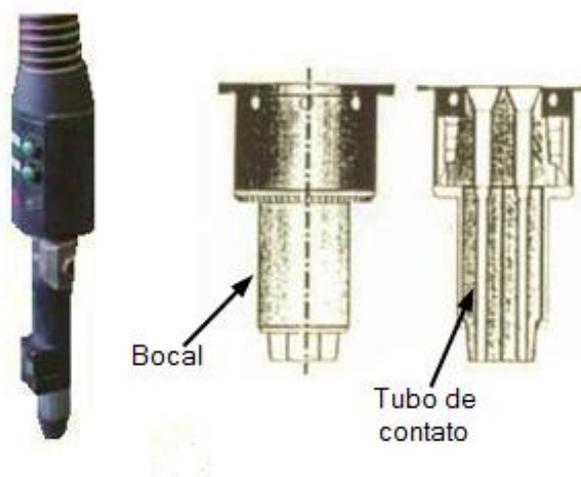
2.9.1 Processo com único potencial (Twin arc)

Nos processos de soldagem que utilizam esta configuração, dois arames passam por um mesmo bico de contato, alimentados por dois alimentadores independentes. Conseqüentemente, os dois arames terão o mesmo potencial elétrico. Neste processo podem ser usadas duas fontes ajustadas com a mesma potência ou uma única fonte, capaz de fornecer energia suficiente para fundir os dois arames. Se a opção for a de utilizar duas fontes, será necessário o uso de um

dispositivo de comunicação entre as fontes para fazer o ajuste automático da tensão no bico de contato.

Duas vantagens deste processo se comparado com o potencial isolado que esta descrito a seguir, é a de que é possível a construção de uma tocha de soldagem mais simples e compacta, o que facilita a implementação de processos automatizados, e a outra vantagem é a de que os dois arames podem ficar bem próximos, devido ao compartilhamento do bico de contato. Em alguns modelos de tochas comerciais, esta distância é de apenas 4 mm. Na Figura 4 pode-se verificar o modelo de tocha utilizado neste processo.

Figura 4 – Tocha de único potencial.



Fonte: Adaptado de Groetelaars (2005).

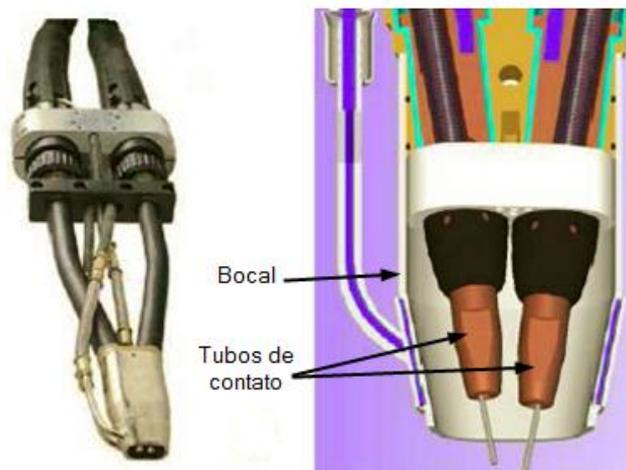
2.9.2 Processo com potencial isolado (Tandem arc)

A principal característica desta configuração de soldagem é que, diferentemente do processo *twin arc*, os dois arames passam por diferentes bicos de contato, que são isolados um do outro por meio de um material isolante no bocal da tocha. Isso possibilita a utilização de diferentes potenciais para cada arame. Para isso, utilizam-se duas fontes de soldagem, com alimentadores de arames independentes. Esta configuração permite maior flexibilidade no ajuste dos parâmetros de soldagem, porém alguns autores já identificaram um problema considerado crítico nestes sistemas que é o sopro magnético. Segundo Motta (2002)

uma forma de contornar este problema é por meio de uma defasagem de corrente em cada arame. Para isso é utilizado um sistema para sincronizar os pulsos entre as duas fontes, sendo que os pulsos da fonte “escrava” são controlados pelos pulsos da fonte “mestra”.

Podem ser usados dois tipos de tocha neste processo de soldagem. Uma delas: as integradas, que são tochas especialmente fabricadas e integradas em um único bocal e, as outras são as integradas, que consistem em tochas convencionais acopladas em suportes especiais. A Figura 5 apresenta este tipo de tocha.

Figura 5 - Tocha com potencial isolado.



Fonte: Adaptado de Groetelaars (2005).

Sistemas com tochas acopladas apresentam algumas vantagens, como maior disponibilidade de peças de reposição e também a possibilidade de ajuste do ângulo de inclinação da tocha e também da distância entre os arames. Porém, em contrapartida, também tem-se algumas desvantagens, como um maior consumo de gás de proteção e algumas dificuldades de acesso às juntas soldadas.

2.10 CRITÉRIOS DE QUALIDADE EM SOLDAGEM

Os cordões de solda realizados pelo processo MAG possuem algumas características decorrentes do processo, que são influenciadas pelos parâmetros usados durante o processo e que podem influenciar nos critérios de validação da

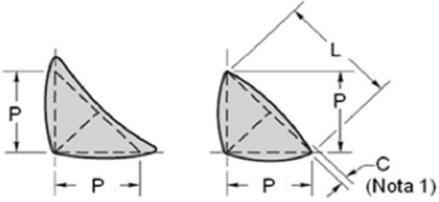
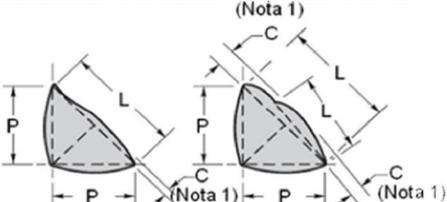
qualidade das juntas soldadas. Neste tópicos foram descritos os principais critérios de qualidade que deverão ser observados e avaliados para aprovação das juntas soldadas pelo processo MAG de alto rendimento.

2.10.1 Geometria do cordão de solda

A forma e a geometria de um cordão de solda são características importantes que devem ser levadas em conta em um projeto de engenharia. Dependendo da geometria e da forma que deseja-se obter, pode-se ter impactos nos tempos de fabricação. Portanto, todas as características de um cordão devem ser cuidadosamente calculadas. Segundo Alves (2009), a geometria de um cordão de solda tem grande influência no desempenho de uma junta soldada, podendo assim, algumas variações comprometerem a qualidade da soldagem da peça, e que para obter soldas de qualidade, é imprescindível ter um bom controle do processo com relação aos parâmetros para que seja atingida a geometria ideal e garantir a integridade da junta.

Neste trabalho, serão trabalhadas juntas em ângulo, tipo “T”, e de acordo com a norma AWS D1.1 (2004), a geometria dos cordões de solda em ângulo poderá apresentar variação somente dentro das especificações descritas no Quadro 1.

Quadro 1: Perfis desejáveis e aceitáveis em solda em ângulo

Perfis Desejáveis	Perfis Aceitáveis
	
<p>Nota 1: A convexidade C do cordão de solda , com relação a dimensão W, não deve exceder os valores definidos na tabela abaixo</p>	
Largura da face W de um cordão de solda	Maxima convexidade C
$W \leq 8 \text{ mm}$	1,6 mm
$W > 25 \text{ mm a } W < 25 \text{ mm}$	3 mm
$W \geq 25 \text{ mm}$	5 mm

2.10.2 Defeitos de continuidade no cordão de solda

Também é muito importante que sejam observados outros defeitos que podem estar presentes em cordões de solda, tais como: mordeduras, falta de fusão ou penetração, trincas e porosidades. Estes têm grandes influências na qualidade dos cordões de solda. Em seguida, segue uma breve descrição de cada um deles para melhor entendimento do assunto.

Sanches (2010), diz que as mordeduras têm como característica uma depressão, ou um entalhe no pé do cordão de solda, entre o metal de base e o cordão. Estas reduzem a seção resistente do cordão e, conseqüentemente, enfraquecem a junta soldada. As mordeduras também prejudicam o acabamento, bem como, podem ser pontos para o surgimento de trincas e processos corrosivos. Citam-se alguns motivos para o surgimento de mordeduras, são eles:

- Altos índices de corrente;
- Altos índices de velocidade de solda;
- Ângulo ou movimento do arame inadequado;
- Distância do bico até a peça muito grande.

A trinca é considerada um dos problemas mais graves em uma junta soldada, isso porque são concentradoras de tensão. Ela pode se formar durante, ou logo após a operação de soldagem, sendo que podem ser visíveis ou não. Uma trinca pode se propagar e causar a quebra de uma junta durante o trabalho da mesma. Normalmente, são causadas quando o arco é fechado muito rapidamente ao final de uma solda, quando o cordão fica muito côncavo ou muito convexo, teores muito altos de carbono no metal de base ou em juntas de múltiplos passes.

Outro defeito comum observado nos processos de solda é a falta de fusão ou penetração, esta se caracteriza pela descontinuidade entre o metal de base e o metal depositado. Segundo Sanches (2010), estas falhas podem aparecer na linha de fusão, na raiz da solda ou também, entre os passes no caso de soldas multi passes. Este defeito impacta em uma redução significativa da resistência da solda, bem como é uma região passível para o início de uma trinca. Os motivos para o surgimento deste problema são correntes muito baixas, altas velocidades de soldagem, diâmetro de arame inadequado, juntas com abertura excessiva e distância excessiva entre a peça e o eletrodo.

O ultimo, porém não menos importante defeito de continuidade são as porosidades, estas se caracterizam pela formação de poros internamente e na face dos cordões de solda. As principais causas deste problema têm relação com oxidações, umidade e sujeira no metal de base ou nos consumíveis usados na operação. Segundo Sanches (2010) este defeito tem como consequência, uma solda frágil e com pouca resistência, bem como, causa uma má impressão do cordão de solda.

2.11 METODOLOGIA TAGUCHI

Durante a década de 50, Genichi Taguchi desenvolveu uma metodologia que usava métodos estatísticos com o objetivo de aumentar a qualidade de produtos manufaturados. Segundo Montgomery 2004, a metodologia de Taguchi, apresenta três objetivos principais:

- Projetar produtos ou processos que sejam robustos em relação às condições ambientais;
- Projetar e desenvolver produtos que sejam robustos à variabilidade de seus componentes;
- Minimizar a variabilidade em torno de um valor nominal.

De acordo com Moita 2007, Taguchi é uma ótima ferramenta, pois trata de um método de *design*, onde é executada somente uma fração de um total possível de combinações de variáveis de entrada para alguma determinada experiência. Para tal, são utilizadas matrizes compostas de vetores ortogonais que definem os experimentos e testes que serão executados. A definição da matriz mais adequada é feita a partir do número de fatores que deseja-se controlar e seus respectivos níveis (MOITA, 2007).

Para Button (2005), a proposta desta metodologia é analisar a resposta média em um determinado número de fatores e, posteriormente, analisar a variabilidade por meio da razão sinal-ruído (S/N). Taguchi descreve estes ruídos como as causas que geram interferências na variabilidade das funções do produto. São utilizadas três razões de sinal-ruído, são elas:

- Menor é melhor – esta razão visa minimizar a resposta. Esta condição pode ser determinada na Equação 2.

$$SN = 10. \log(1/n \sum_{i=1}^n yi^2) \quad (2)$$

SN= Transformação do Sinal/ Ruído em decibéis

n= Número de observações;

yi²= I-néssima resposta para cada experimento.

- Maior é melhor- esta razão visa maximizar a resposta. Esta condição pode ser observada na Equação 3.

$$SN = 10. \log(1/n \sum_{i=1}^n 1/yi^2) \quad (3)$$

SN= Transformação do Sinal/ Ruído em decibéis

n= Número de observações;

yi²= I-néssima resposta para cada experimento.

- Nominal é melhor- esta razão visa diminuir a variabilidade em volta de um valor nominal. Esta condição pode ser observada na Equação 4.

$$SN = 10. \log\left(\frac{y^2}{S^2}\right) \quad (4)$$

SN= Transformação do Sinal/ ruído em decibéis;

y²= Valor médio ao quadrado;

S²= Variância das respostas de cada experimento.

Ao aplicar a análise da variância sobre os resultados dos testes, pode-se estabelecer os fatores que têm maior influência na redução da variação e nos permite ajustar a média da variável a ser controlada. Moita (2007) refere também, que é possível identificar os valores que apresentam os melhores resultados que impactam na qualidade do produto.

3 METODOLOGIA

Neste t3pico ser3o abordados os m3todos empregados na realiza3o deste trabalho, bem como os materiais e equipamentos que foram utilizados nos testes pr3ticos.

3.1 MATERIAIS

Para a execu3o dos experimentos foram utilizados corpos de prova de a3o SAE 1020, produzidos na empresa John Deere Brasil. Empresa esta que disponibilizou todo o material e equipamentos necess3rios para esta pesquisa.

Os corpos de prova foram obtidos de uma chapa de espessura 6 mm, atrav3s de um processo de corte laser. Para o corte dos mesmos foram utilizadas as seguintes dimens3es: 50 X 100 X 6 mm. A soldagem foi realizada utilizando dois rob3s Yaskawa MA 2700, conforme Figura 6 (a). Os rob3s foram programados para soldar ao mesmo tempo na mesma po3a de fus3o, simulando uma condi3o de duas tochas acopladas em um processo Tandem. Nesta experi3ncia usou-se um g3s de prote3o misto, com 82% de Arg3nio e 18% de CO2 conhecido como C18, ou seja, utilizou-se uma pequena porcentagem de g3s ativo na mistura para favorecer a penetra3o de solda. A vaz3o do g3s foi de 20 L/min nas duas tochas.

Figura 6 – (a) Rob3 Motoman, (b) Fonte de solda Muller



A) Robo



B) Fonte

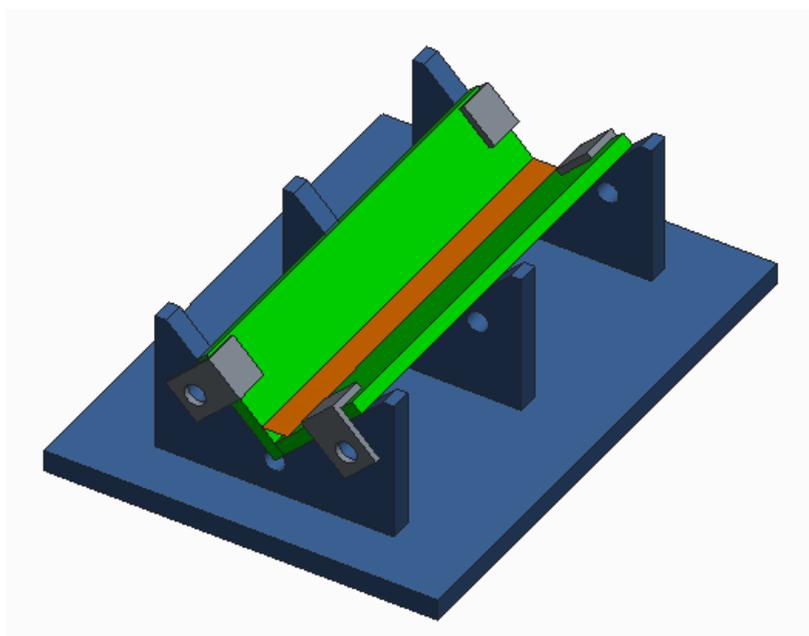
Fonte: Motomann

Nos experimentos foram utilizadas duas fontes Miller Auto Axxess 450 inversoras digitais, ilustradas na Figura 6 (b), controladas remotamente pelo

controlador do robô. Estas fontes possuem capacidade de saída de corrente de até 450 A, sendo que podem ser configuradas para soldagem em curto circuito, aerossol e arco pulsado. Para os experimentos, as fontes foram configuradas no modo de arco pulsado. Como material de adição, foi utilizado arame maciço Esab do tipo OK Aristorod 12.5, norma AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro.

Para posicionamento dos corpos de prova na posição de soldagem utilizou-se um dispositivo, o qual tem a capacidade de restringir o movimento das chapas durante a soldagem. O mesmo pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Dispositivo de solda



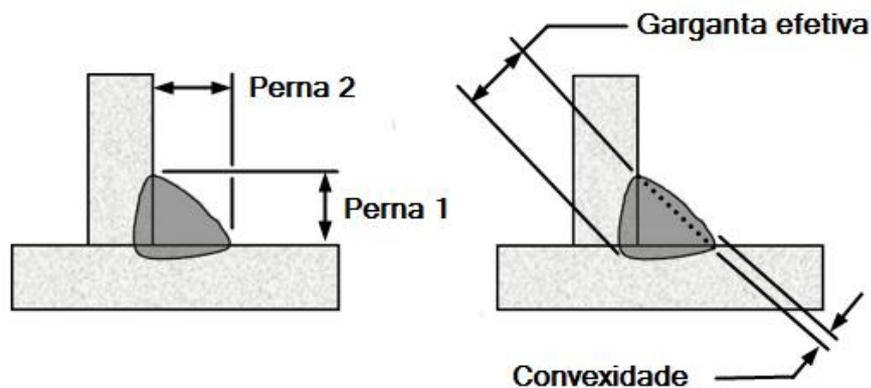
Os corpos de prova foram devidamente preparados para a análise laboratorial, os mesmos passaram por uma operação de limpeza que consistiu em uma escovação e, na sequência, foram retiradas as amostras. Utilizaram-se os seguintes equipamentos para a preparação e análise:

- Equipamento de corte Marca Discoton – 2;
- Equipamento para polimento Ecomet – 4;
- Microscópio Olympus BX51M – Capacidade 1000X;

3.2. MÉTODOS E TÉCNICAS

Por meio do embasamento teórico foi desenvolvido o projeto experimental. Este teve como objetivo, mesclar os melhores parâmetros de soldagem com os melhores critérios de qualidade, assim conseguindo o máximo em produtividade, sem perdas em qualidade. Os critérios avaliados foram: a convexidade, a garganta efetiva, o tamanho médio das pernas do cordão de solda e a taxa de deposição de arame. A Figura 8 mostra cada parte do cordão analisada.

Figura 8- Critérios analisados



Fonte: Adaptado de Berger, 2012.

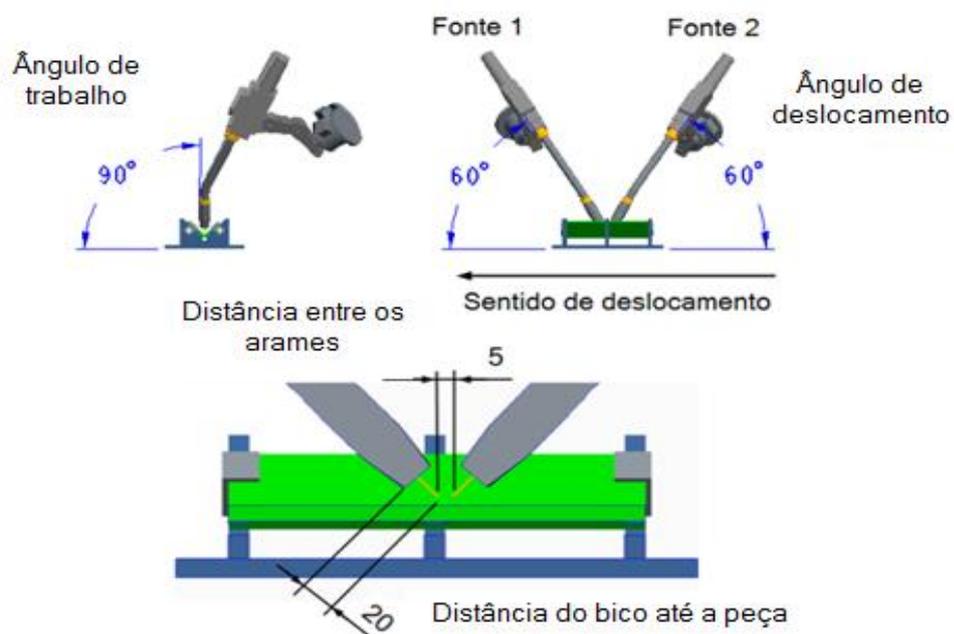
Alguns parâmetros do processo de soldagem foram definidos para serem variados durante o projeto experimental, são eles: tensão, velocidade de deslocamento da tocha e a velocidade de alimentação do arame. Realizou-se uma análise nos desenhos dos conjuntos soldados da empresa que permitiu a realização deste trabalho, e estes mostraram que os tamanhos de pernas mais utilizados variam de 3 a 10 mm, e a grande maioria dos filetes encontra-se na faixa dos 6 mm. Por este motivo, os experimentos foram realizados buscando um cordão de solda com pernas de 6 mm. Através de testes preliminares foram determinados três níveis para cada parâmetro, que podem ser visualizados no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros de soldagem

Nº	Parâmetro	Unidade	Nível	Valor
1	Tensão da fonte 1	Volts (V)	1	24
			2	27
			3	30
2	Tensão da fonte 2	Volts (V)	1	24
			2	27
			3	30
3	Velocidade de Alimentação da fonte 1	m/min	1	7,6
			2	8,9
			3	10,1
4	Velocidade de Alimentação da fonte 1	m/min	1	7,6
			2	8,9
			3	10,1
5	Velocidade de deslocamento das tochas	cm/min	1	60
			2	70
			3	80

Também foi definida a posição das tochas durante a soldagem dos corpos de prova. Na Figura 9, pode-se visualizar a posição pré-definida. A distancia do bico de contato até a peça usada foi de 20 mm e a distância entre os fios de consumível na poça de fusão foi de 5 mm. O ângulo de trabalho foi fixado a 90° e o ângulo de deslocamento a 60° . Esta posição foi definida desta forma, a fim de simular a posição de uma tocha acoplada com potencial isolado.

Figura 9 - Posição de soldagem das tochas



Através do número de parâmetros do processo de soldagem que foram definidos, elaborou-se uma matriz experimental para orientar os experimentos, conforme Quadro 03. Com os cinco parâmetros e mais os três níveis, definiu-se uma matriz do tipo L27, que permitiu o cruzamento dos valores de cada parâmetro em diferentes níveis.

Quadro 03 - Variação dos parâmetros para cada corpo de prova

Nº Corpo de prova	Voltagem fonte 1 (Volts)	Voltagem fonte 2 (Volts)	Velocidade de alimentação fonte 1 (m/min)	Velocidade de alimentação fonte 2 (m/min)	Velocidade de deslocamento (cm/min)
1	24	24	7,6	7,6	60
2	24	24	7,6	7,6	70
3	24	24	7,6	7,6	80
4	24	26	8,9	8,9	60
5	24	26	8,9	8,9	70
6	24	26	8,9	8,9	80
7	24	28	10,1	10,1	60
8	24	28	10,1	10,1	70
9	24	28	10,1	10,1	80
10	26	24	8,9	10,1	60
11	26	24	8,9	10,1	70
12	26	24	8,9	10,1	80
13	26	26	10,1	7,6	60
14	26	26	10,1	7,6	70
15	26	26	10,1	7,6	80
16	26	28	7,6	8,9	60
17	26	28	7,6	8,9	70
18	26	28	7,6	8,9	80
19	28	24	10,1	8,9	60
20	28	24	10,1	8,9	70
21	28	24	10,1	8,9	80
22	28	26	7,6	10,1	60
23	28	26	7,6	10,1	70
24	28	26	7,6	10,1	80
25	28	28	8,9	7,6	60
26	28	28	8,9	7,6	70
27	28	28	8,9	7,6	80

De acordo com a matriz, foi executada a soldagem dos corpos de prova. Na Figura 10 (a) está um compilado com imagens da soldagem e na figura 10 (b) estão ilustrados as seções das 27 amostras.

Figura 10 – (a) Soldagem dos corpos de prova e (b) seções das amostras



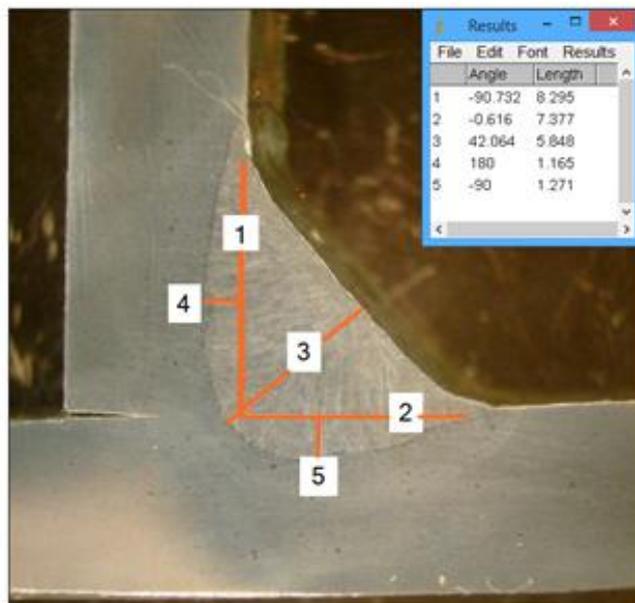
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a realização da soldagem dos corpos de prova, os mesmos foram analisados visualmente a fim de identificar defeitos e descontinuidades como: mordeduras, trincas e porosidades, sendo que nenhum apresentou tais problemas. A convexidade também não se mostrou um problema nos experimentos, já que todos os corpos de prova apresentaram filetes planos, sendo assim, de acordo com a norma AWS D1.1, considerados aceitáveis. Também foi feita uma pesagem para comparação do peso de cada corpo de prova, para determinar a taxa de deposição de arame. Esta comparação foi feita confrontando o peso original dos corpos de prova, que era de 943 g, com o peso após a realização da soldagem.

Na sequência, os corpos foram preparados no laboratório e avaliados os demais critérios previamente definidos. A medição das variáveis foi feita através do *software* ImageJ, e a Figura 11 mostra como foi feita a coleta de dados, sendo que:

- 1- Comprimento da perna 1 (mm)
- 2- Comprimento da perna 2 (mm)
- 3- Comprimento da garganta efetiva (mm)
- 4- Penetração 1 (mm)
- 5- Penetração 2 (mm)

Figura 11 - *Software* usado na coleta de dados



Os resultados obtidos através da análise dos corpos de prova pode ser visto no Quadro 4.

Quadro 4- Respostas dos testes experimentais

Respostas dos testes experimentais					
Nº do corpo de prova	Garganta Efetiva (mm)	Perna 1 (mm)	Perna 2 (mm)	Media Pernas (mm)	Deposição de arame (kg/h)
1	5,1	9,3	6,6	7,95	8,639
2	5,2	7,7	6,9	7,3	8,606
3	5	7,3	6,1	6,7	8,409
4	5,3	8,5	8,1	8,3	9,719
5	5,7	8	7,1	7,55	9,236
6	5,3	8,5	7,7	8,1	12,254
7	7,2	9,4	10	9,7	13,319
8	6,3	8,3	8,8	8,55	11,965
9	5,9	8,1	8,2	8,15	12,494
10	6,1	10,7	7,7	9,2	11,519
11	6	8	8,5	8,25	11,125
12	5,8	7,2	8,6	7,9	11,533
13	6,3	8	8,2	8,1	9,179
14	5,3	7,8	6,9	7,35	8,816
15	5,3	7,4	7	7,2	9,611
16	5,4	8,1	9	8,55	10,259
17	5,3	7,2	8	7,6	9,446
18	5,2	7	7,2	7,1	9,370
19	6	9,2	8,6	8,9	11,159
20	5,9	8,2	7,5	7,85	10,076
21	5,9	7,6	7,7	7,65	11,052
22	6,1	8,4	8,5	8,45	10,079
23	5,7	8,8	8,2	8,5	11,755
24	5,1	7,2	7,3	7,25	9,851
25	5,4	8,7	8,4	8,55	10,259
26	5,7	7,7	8	7,85	10,076
27	5,1	7,1	6,7	6,9	8,890

4.1 TAXA DE DEPOSIÇÃO DE ARAME.

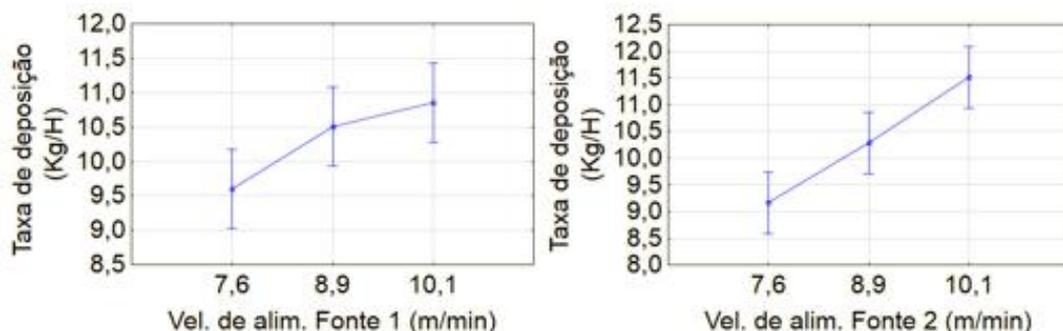
Como comentado anteriormente, a taxa de deposição de arame foi determinada comparando-se a massa do corpo de prova antes e depois da soldagem, fazendo uma relação com o tempo de soldagem. Esta taxa sofreu variações entre 8,41 e 13,31 kg/h, conforme pode ser visto no Quadro 6. O estudo da variância apresentou um resultado com 95% de certeza que os parâmetros velocidade de alimentação da Fonte 1 e Fonte 2 são os que exercem maior influência sobre a taxa de deposição de arame. Pode-se afirmar isso, pois o valor de P foi menor do que 0,05, conforme Quadro 5. Afirma-se então, que estes parâmetros tiveram grande influência sobre este critério.

Quadro 5 - Análise da variância para a taxa de deposição de arame

Parâmetros	SS	MS	F	P
Tensão da fonte 1	0,37485	0,187423	0,42560	0,660560
Tensão da fonte 2	1,16016	0,580081	1,31726	0,295404
Vel. de alim. F1	5,20092	2,600462	5,90516	0,012004
Vel. de alim. F2	17,43164	8,715819	19,79198	0,000047
Vel. de deslocamento	0,36681	0,183406	0,41648	0,666309

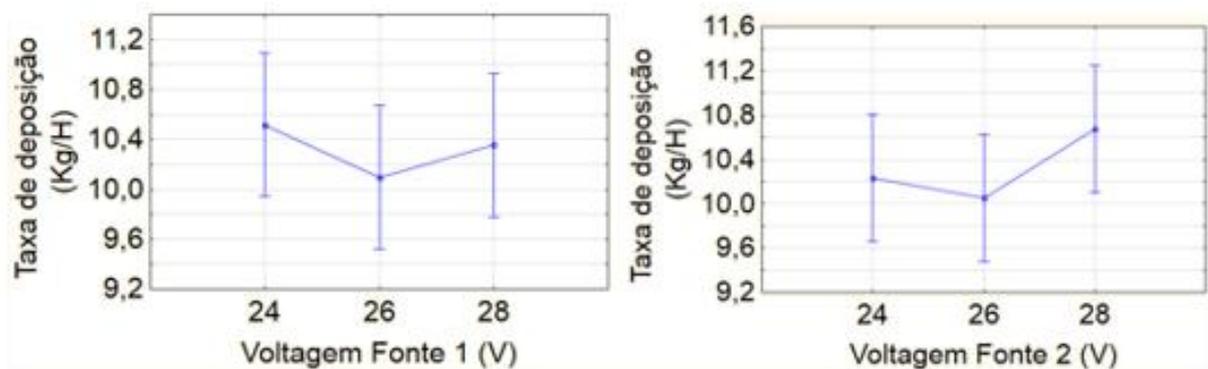
Para melhorar a visualização da influência destes parâmetros sobre a taxa de deposição, foram plotados os gráficos que facilitam o entendimento. Na Figura 12 verifica-se a influência da velocidade de alimentação nas fontes 1 e 2 sobre a taxa de deposição, sendo que o valor de 10,1 m/min é o que apresenta os melhores resultados em ambos os casos.

Figura 12 – Taxa de deposição em função da velocidade de alimentação



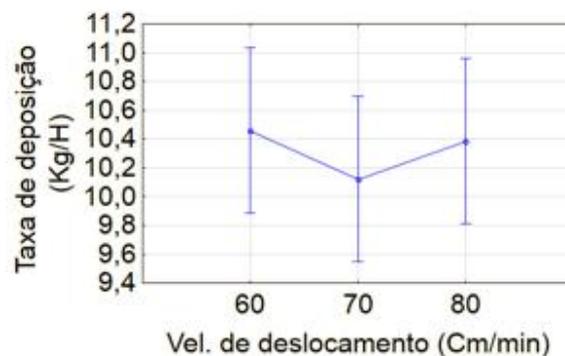
Na Figura 13 verificam-se os resultados em função da tensão, pode-se perceber que a mesma exerceu influência sobre a taxa de deposição, porém de maneira menos significativa, pois o valor de P ficou maior que 0,05. Os resultados mostram que a tensão 24 V na fonte 1 e 28 V na fonte 2 favorecem uma maior taxa de deposição.

Figura 13- Taxa de deposição em função da tensão



A velocidade de deslocamento das tochas também não mostrou muita influência sobre a taxa de deposição conforme valor de P no Quadro 5. A Figura 14 mostra que a velocidade de 60 Cm/min apresenta os melhores resultados para a taxa de deposição.

Figura 14 - Taxa de deposição em função da velocidade de deslocamento



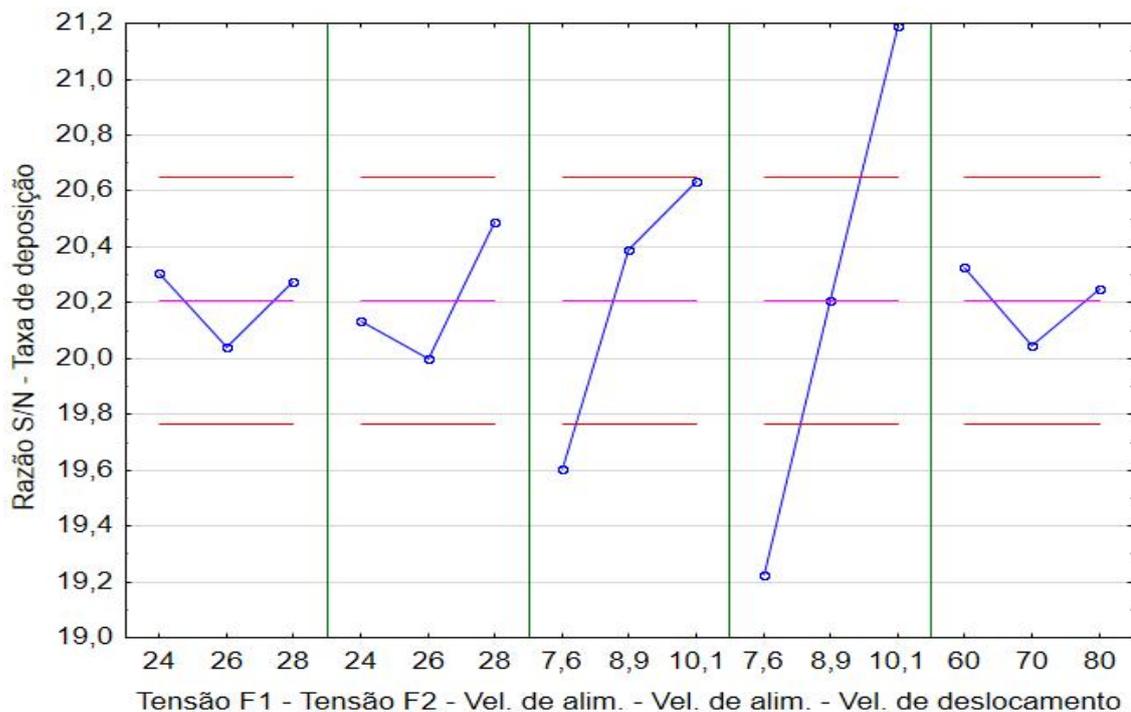
Ao analisar a razão sinal-ruído para a taxa de deposição de arame, pode-se afirmar com 95% de certeza, que a velocidade do arame nas duas fontes é o

parâmetro que exerce maior influência sobre este critério. Considerando que a razão S/N maior é melhor, a maior taxa de deposição de metal de adição ser utilizando os seguintes parâmetros:

- Tensão da fonte 1: 24 V;
- Tensão da fonte 2: 28 V;
- Velocidade do arame da fonte 1: 10,1 m/min;
- Velocidade do arame da fonte 2: 10,1 m/min;
- Velocidade de deslocamento: 60 Cm/min.

Na Figura 15 visualizam-se estes resultados.

Figura 15 - Razão S/N para os parâmetros analisados



Um novo corpo de prova utilizando os parâmetros favoráveis à maior taxa de deposição de arame foi produzido, sendo que o mesmo confirmou os estudos realizados. O corpo apresentou uma taxa de deposição na faixa de 13,85 kg/h, tendo inicialmente 943 g e 1020 g após a soldagem.

4.2 PERNAS

Para a análise do tamanho das pernas foi considerado o tamanho médio entre as duas pernas, já que a tendência é de que as mesmas fiquem do mesmo tamanho quando o arame for direcionado exatamente na junta. Observa-se no Quadro 4, que o tamanho das pernas apresenta em alguns casos uma ligeira diferença entre os comprimentos. Isso aconteceu devido à soldagem robotizada dos corpos, ou seja, em alguns casos houve alguma variação no posicionamento das peças, por ser um processo experimental, e o arame não ficou direcionado exatamente na junta.

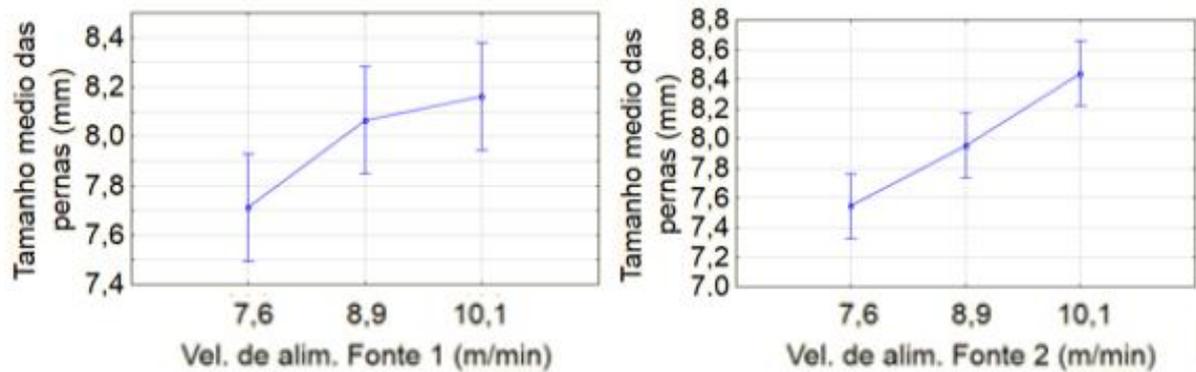
Os valores médios das pernas variaram entre 6,7 e 9,7 mm. Através do estudo da variância, pode-se afirmar com 95% de certeza, que as velocidades de arame da fonte 1 e 2 e a velocidade de deslocamento são os parâmetros que exercem maior influência sobre o tamanho das pernas, pois o valor de P foi menor que 0,05 para estes três parâmetros conforme Quadro 6.

Quadro 6 - Análise da variância para o tamanho das pernas

Parâmetros	SS	MS	F	P
Tensão da fonte 1	0,061507	0,030754	0,27343	0,764249
Tensão da fonte 2	0,250652	0,125326	1,11428	0,352324
Vel. de alim. F1	1,211357	0,605679	5,38510	0,016284
Vel. de alim. F2	4,242466	2,121233	18,85991	0,000062
Vel. de deslocamento	7,724461	3,862231	34,33914	0,000002

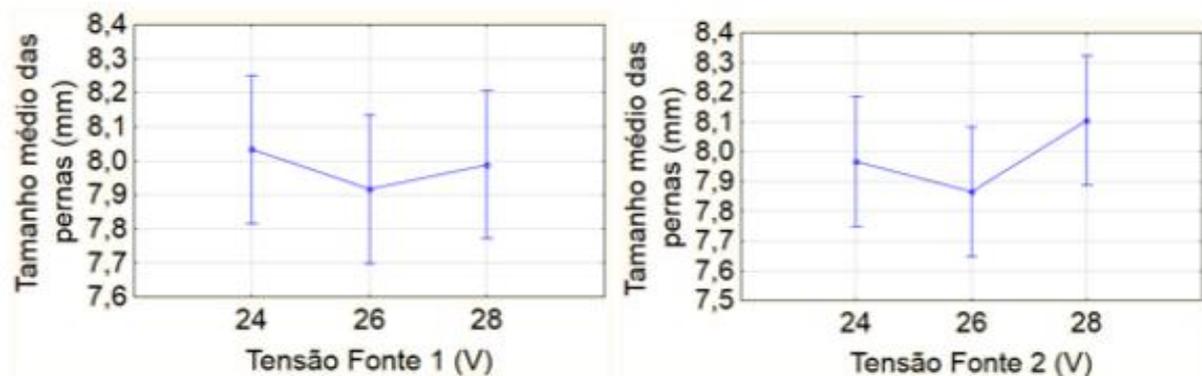
Para melhorar a visualização da influência destes parâmetros sobre o tamanho médio das pernas, foram plotados os gráficos que facilitam o entendimento. Na Figura 16 verifica-se a influência da velocidade de alimentação nas fontes 1 e 2 sobre este critério, sendo que quanto maior o valor da velocidade maior será o tamanho das pernas. Como buscavam-se pernas com 6 mm neste trabalho, os valores de 7,6 m/min são considerados ideais neste caso.

Figura 16- Tamanho das pernas em função da velocidade de alimentação.



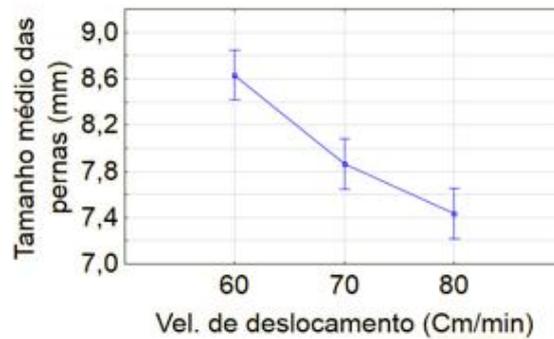
Na Figura 17 verificam-se os resultados em função da tensão, pode-se perceber que a mesma exerceu influência sobre a taxa de deposição, porém de maneira menos significativa. Os resultados mostram que a tensão 26 V em ambas as fontes favorecem para o atingimento de uma perna com 6 mm.

Figura 17- Tamanho das pernas em função da tensão.



Já a velocidade de deslocamento das tochas mostrou grande influência sobre o tamanho médio das pernas. Na Figura 18 observa-se que o tamanho das pernas tende a diminuir em função do aumento da velocidade da tocha.

Figura 18 - Tamanho das pernas em função da velocidade de deslocamento.

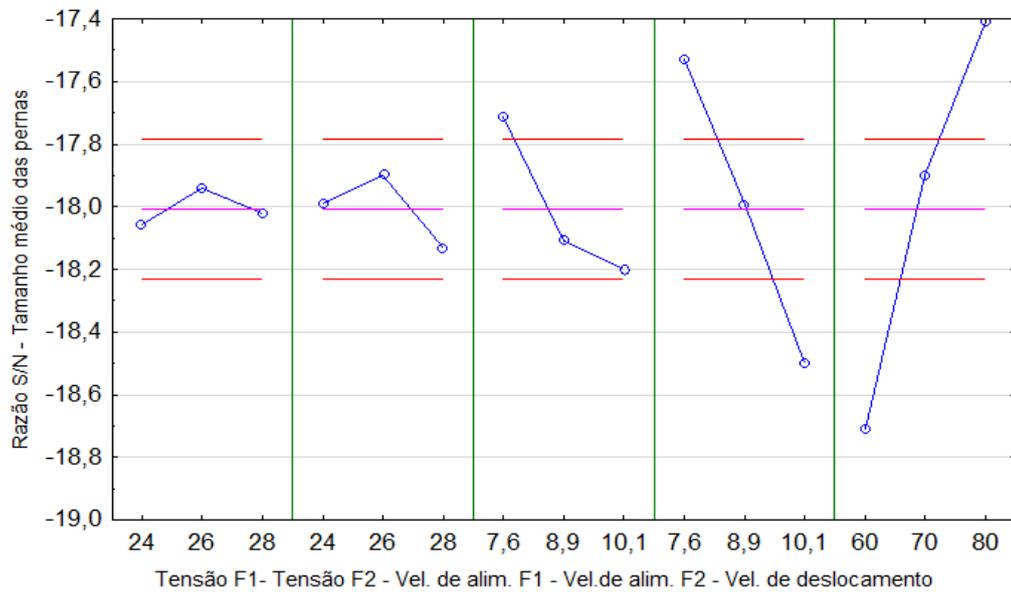


Com relação à razão sinal-ruído para o tamanho médio das pernas, afirmam-se com 95% de certeza, que a velocidade de alimentação nas duas fontes e a velocidade de deslocamento é os parâmetros que exercem maior influência sobre este critério. Considerando que a razão S/N nominal é melhor, ou seja, 6 mm, pernas com o tamanho mais próximo do desejado serão obtidas utilizando os seguintes parâmetros:

- Tensão da fonte 1: 26 V;
- Tensão da fonte 2: 26 V;
- Velocidade do arame da fonte 1: 7,6 m/min;
- Velocidade do arame da fonte 2: 7,6 m/min;
- Velocidade de deslocamento: 80 Cm/min.

Na Figura 19 visualizam-se estes resultados.

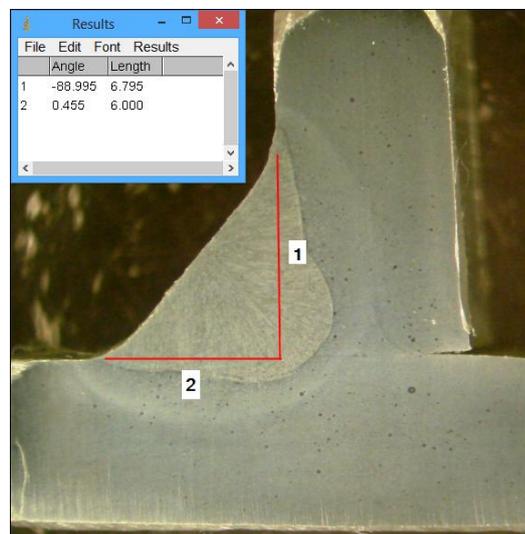
Figura 19 - Razão S/N para os parâmetros analisados



Um novo corpo de provas utilizando os parâmetros favoráveis ao atingimento de pernas com 6 mm foi produzido, sendo que o mesmo confirmou os estudos realizados. O corpo apresentou pernas de 6,7 mm para a perna 1 e de 6 mm para perna 2, como pode ser comprovado na Figura 20, sendo que:

- 1- Comprimento da perna 1 (mm).
- 2- Comprimento da perna 2 (mm)

Figura 20 – Medida das pernas do corpo de prova



4.3 GARGANTA EFETIVA

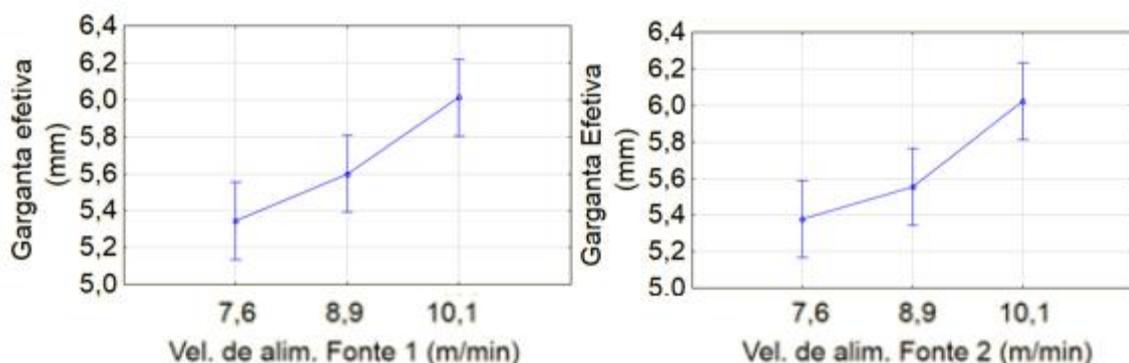
Conforme pode ser visualizado no Quadro 4, os valores para a garganta efetiva variaram entre 5 e 7,2 mm. Neste caso, que é soldagem em junta "T", o ideal é que tenha-se uma ótima penetração na junta, ou seja, pode-se usar a razão maior é melhor para avaliação deste critério. Através do estudo da variância, pode-se afirmar com 95% de certeza, que a velocidade de alimentação das duas fontes e a velocidade de deslocamento são os parâmetros com maior influência sobre este critério, pois o valor de P foi menor que 0,05 para estes três parâmetros conforme Quadro 7.

Quadro 7 - Análise da variância para o tamanho da garganta efetiva.

Parâmetros	SS	MS	F	P
Tensão da fonte 1	0,006483	0,003241	0,01755	0,982619
Tensão da fonte 2	0,213064	0,106532	0,57690	0,572899
Vel. de alim. F1	4,579073	2,289537	12,39846	0,000560
Vel. de alim. F2	4,470824	2,235412	12,10536	0,000628
Vel. de deslocamento	2,293539	1,146770	6,21007	0,010091

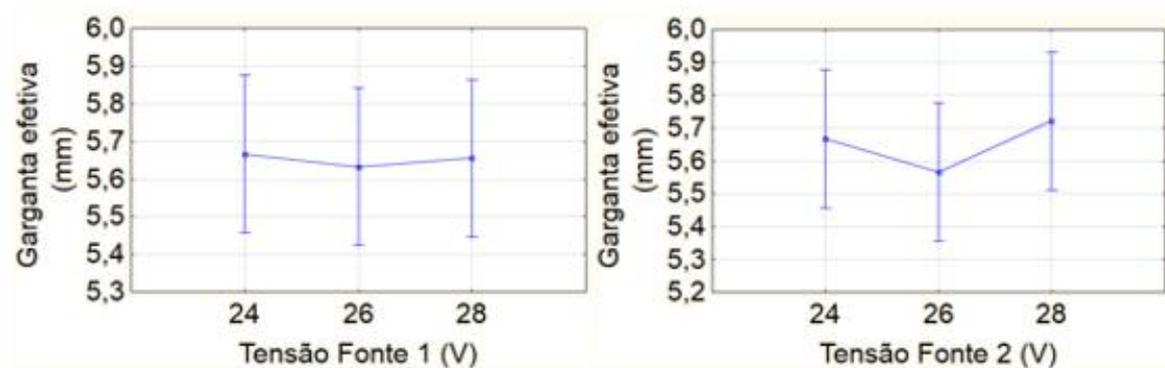
Para melhorar a visualização da influência destes parâmetros sobre a garganta efetiva, foram plotados os gráficos que facilitam o entendimento. Na Figura 21 verifica-se a influência da velocidade de alimentação nas fontes 1 e 2 sobre a garganta efetiva, sendo que o valor de 10,1 m/min é o que apresenta os melhores resultados em ambos os casos.

Figura 21- Garganta efetiva em função da velocidade de alimentação



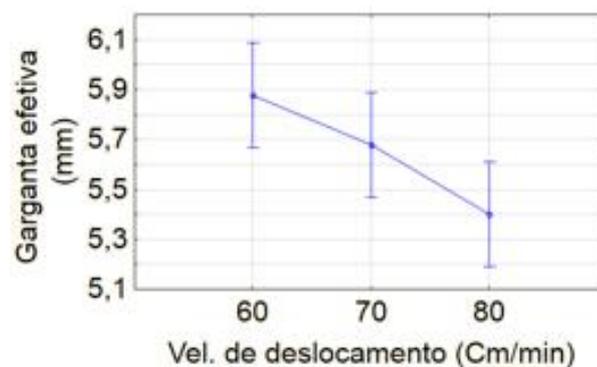
Na Figura 22 apresentam-se os resultados em função da tensão, percebe-se que a mesma exerceu influência sobre a garganta efetiva, porém de maneira menos significativa. Os resultados mostram que a tensão 24 V na fonte 1 e 28 V na fonte 2 favorecem para o atingimento de uma garganta maior.

Figura 22- Garganta efetiva em função da tensão



Já a velocidade de deslocamento das tochas mostrou grande influência sobre a garganta efetiva. Na Figura 23 observa-se que o tamanho da garganta tende a diminuir em função do aumento da velocidade da tocha.

Figura 23- Garganta efetiva em função da velocidade de deslocamento



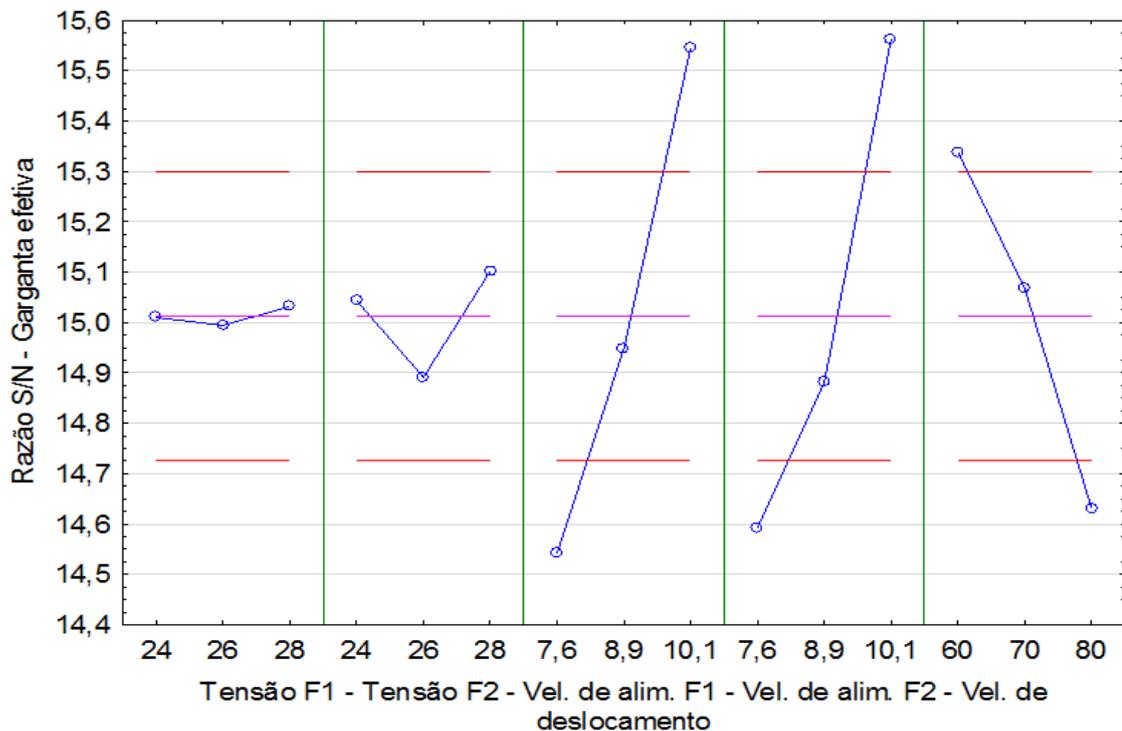
Ao analisar a razão sinal-ruído para o tamanho da garganta efetiva, pode-se afirmar com 95% de certeza, que a velocidade do arame nas duas fontes e a velocidade de deslocamento são os parâmetros que exercem maior influência sobre

este critério. Considerando que a razão S/N maior é melhor, gargantas efetivas maiores serão obtidas utilizando os seguintes parâmetros:

- Tensão da fonte 1: 24 V;
- Tensão da fonte 2: 28 V;
- Velocidade do arame da fonte 1: 10,1 m/min;
- Velocidade do arame da fonte 2: 10,1 m/min;
- Velocidade de deslocamento: 60 Cm/min.

Na Figura 24 visualizam-se estes resultados.

Figura 24 - Razão S/N para os parâmetros analisados



Um novo corpo de provas utilizando os parâmetros favoráveis ao atingimento de uma maior garganta efetiva foi produzido, sendo que o mesmo confirmou os estudos realizados. O corpo apresentou uma garganta de 7,5 mm, como pode ser comprovado na Figura 25.

Figura 25 – Medida da garganta efetiva do corpo de prova



5 CONCLUSÕES

Realizou-se a soldagem de filete em juntas em ângulo do tipo “T” em chapas SAE 1020 pelo método de soldagem de duplo arame configurado em Tandem, através de um processo de soldagem robotizado e foi possível tirar as seguintes conclusões.

Os parâmetros de soldagem possuem grande influência na geometria e na qualidade dos cordões de solda, e podem determinar quais os melhores parâmetros para atender a cada critério estudado. O método Taguchi foi importante para a realização das análises dos resultados dos experimentos, já que o projeto gerou um grande número de variáveis de entrada e de saída, e sem este método seria muito complicado chegar às conclusões obtidas neste trabalho.

A taxa de deposição de arame atingida nos experimentos condiz com os estudos realizados anteriormente, sendo que se atingiu uma taxa de 13,85 kg/h. Também foi possível determinar que a velocidade de alimentação é o parâmetro que tem a maior influência neste critério, ou seja, quanto maior a velocidade de alimentação, maior será a taxa de arame depositado.

Tratando-se de atingir certo tamanho de pernas, podem-se determinar os parâmetros que têm maior influência neste critério. A velocidade de alimentação e a velocidade de deslocamento se mostraram os parâmetros que determinam o tamanho final das pernas. A razão observada entre a velocidade de alimentação e o tamanho das pernas é linear, aumentando a velocidade de alimentação, o tamanho das pernas também aumentará. O contrário acontece com a velocidade de deslocamento, ou seja, quanto menor a velocidade de deslocamento, maior o tamanho das pernas.

Da mesma forma que o tamanho das pernas, a garganta efetiva é influenciada pelas velocidades de alimentação e deslocamento, e também na mesma razão.

De uma maneira geral, pode-se afirmar que as velocidades de alimentação e a velocidade de deslocamento são os parâmetros com maior influência sobre os critérios analisados no processo de solda Tandem. A relação entre as variáveis de entrada e de saída é linear nestes parâmetros, ou seja, aumentando ou diminuindo os mesmos, teremos um resultado proporcional no filete de solda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES. V. J. **Desenvolvimento de envelopes operacionais para processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica / Minas, Metalúrgica e Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do SUL, PORTO ALEGRE, 2009.

AWS. **Welding Handbook. v. 2: Welding Process**, 7 ed. *International Standard Book Number*. 07842b5 0014731-3. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Rd., P. O. Box 351040, Miami, FL 33135, 1991.

_____. AWS D1.1/D1.1M. **Structural Welding Code – Steel**, 2004

BERGER. D. R. **Determinação dos melhores parâmetros de processo para a soldagem robotizada do aço LNE 700**, 2012. Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica

BRACARENSE. A. Q.; FELIZARDO, I. **Soldagem robotizada**, 2008.

BRANDI. S. D. Processo MIG/MAG. In: BRANDI, S. D.; WAINER E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004. p. 99-132.

BUTTON. Sérgio T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005

ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: ESAB Soldagem e Corte, 2004. (Relatório técnico de soldagem)

GIMENES. JR. LUIZ; JOSÉ PINTO RAMALHO – **Conceitos De Soldagem Mig/Mag**. Disponível em Site Infosolda. www.infosolda.Com.br/download/61dpe.Pdf - 2005

GROETELAARS. P.J. **Influencia da variação dos parametros de soldagem sobre a transferencia metalica perfil do cordão no processo MIG/MAG duplo arame**. 2005. Dissertação de pós-graduação em Engenharia Mecânica.

KIM. Y.S & EAGAR , T. W 1993A – **Analisy Of Metal Transfer In Gas Metal Arcwelding**. *Welding Journal* , 72(7), July.

LIAO. M. T.; CHEN, W. J. **The effect of shielding gas compositions on the microstruture and mechanical properies of stainless steel weldments**. *Materials chemistry and physics*, Huwei: Elsevier. v. 55, p. 145-151, mar. 1998.

MARQUES. P. V.; MODENESI. P. J.; BRACARENSE. A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia** – 3ª edição- Belo Horizonte. (2009)

MACHADO. I. G. **Soldagem e técnica convexas: Processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MODENESI. P. J. **Soldagem I: Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas**. Belo Horizonte: Editado pelo autor, 2001.

MOITA. N. F. V. C. **Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica, Lisboa, 2007.

MONTGOMERY. D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MOTOMAN. **Catalogo de produtos.** 2014. Disponível em <http://www.motoman.com/products/robots/arc-welding-robots.php>

MOTTA. Marcelo. **Aplicação do processo MIG/MAG pulsado com duplo arame e potenciais isolados em soldagens de revestimento.** UFSC-2002.

SANCHES. R.A. **Defeitos em solda detectados através de inspeção visual.**2010. Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil.

WEMAN. K. **Welding Processes Handbook, Second Edition (Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies), 2003**

_____. **Welding Handbook v. 1: Welding Science & Technology.** 9 ed. International Standard Book Number. 08456b6 0016831-2. *American Welding Society.* 550N. W. LeJeune