



**Cristian Fin Schneider**

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM HÍBRIDA  
TIG-MIG/MAG UTILIZANDO O MÉTODO TAGUCHI**

**Horizontina**

**2014**

**Cristian Fin Schneider**

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM HÍBRIDA  
TIG-MIG/MAG UTILIZANDO O MÉTODO TAGUCHI**

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: Richard Thomas Lermen, Doutor.

**Horizontina**

**2014**

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

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

**“Otimização de um processo de soldagem híbrida TIG–MIG/MAG utilizando o método Taguchi”**

**Elaborada por:**

**Cristian Fin Schneider**

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

**Aprovado em: 30/10/2014  
Pela Comissão Examinadora**

---

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

---

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

**Horizontina  
2014**

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, que me educaram com todos os valores e princípios, não medindo esforços para que este momento um dia chegasse.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela força durante toda esta caminhada.

À minha família, minha mãe Marli, meu pai Inácio e meus irmãos Cassiano e Vitor, que sempre estiveram presentes em minha vida.

À minha namorada Nayara, que esteve ao meu lado em todos os momentos desta graduação, incentivando-me para que este sonho se tornasse realidade.

Ao professor orientador e amigo, Dr. Richard T. Lermen, por toda a sua dedicação, ensinamento e orientação para que este trabalho se concretizasse.

Aos professores que tive ao longo destes cinco anos de graduação, pela sua contribuição em minha formação pessoal e profissional.

À Fabor, pela disponibilização de toda estrutura necessária para a realização deste trabalho.

Às pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os amigos cultivados ao longo de minha vida.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”

(Albert Einstein)

## RESUMO

A soldagem híbrida consiste na combinação de diferentes tipos de soldagem em um mesmo processo, com características próprias, neste contexto, destaca-se a soldagem híbrida TIG-MIG/MAG, obtida com a junção das soldagens TIG e MIG/MAG em uma mesma zona de soldagem. O objetivo deste trabalho foi realizar a otimização de um processo de soldagem híbrida TIG-MIG/MAG em relação à geometria do cordão de solda e identificar a influência dos parâmetros de soldagem híbrida sobre esta geometria. Os parâmetros variados e testados nesta pesquisa foram: tipo de gás de proteção MIG/MAG, tensão MIG/MAG, velocidade de alimentação do arame MIG/MAG, vazão do gás de proteção TIG, intensidade da corrente TIG e velocidade de soldagem. As variáveis de saída analisadas foram a penetração, a zona afetada pelo calor (ZAC), a largura e o reforço. O projeto de experimentos foi desenvolvido através de uma matriz experimental L27. O método Taguchi foi utilizado para o projeto de experimentos e para a análise estatística dos resultados. O procedimento experimental foi efetuado através da soldagem automatizada de vinte e sete amostras, com deposição de cordões de solda sobre peças de Aço SAE 1045 e análise da geometria das soldas através da revelação da macrografia das mesmas. As técnicas de análise dos resultados, baseadas no método Taguchi, foram a análise de variância, que apontou a probabilidade de influência dos parâmetros sobre as variáveis de saída e a razão sinal-ruído, que apresentou a otimização do processo de soldagem híbrida. A penetração foi influenciada significativamente pela velocidade de alimentação do arame MIG/MAG, tipo de gás de proteção MIG/MAG, tensão MIG/MAG e velocidade de soldagem. A ZAC obteve influências da tensão MIG/MAG, tipo de gás de proteção MIG/MAG, velocidade de soldagem e intensidade da corrente TIG. Todos os parâmetros variados apresentaram efeitos sobre a largura, exceto a velocidade de alimentação do arame MIG/MAG. O reforço foi influenciado significativamente pela velocidade de alimentação do arame MIG/MAG e pela intensidade da corrente TIG. A otimização do processo foi realizada, de forma que para cada variável de saída foram indicados os valores de parâmetros que devem ser utilizados, confirmou-se a otimização através da soldagem de amostras de comprovação.

**Palavras-chave:** Soldagem híbrida. Otimização. Taguchi. TIG. MIG/MAG.

## ABSTRACT

The hybrid welding is the combination of different welding types in a same process, with own characteristics, in this context, stands out the GTAW-GMAW hybrid welding, obtained by GTAW and GMAW welding junction in a same welding zone. The purpose of this study was to perform the optimization of a hybrid welding process GTAW-GMAW in relation to weld bead geometry and identify the hybrid welding parameters influence on this geometry. The parameters varied and tested in this research were: GMAW shielding gas type, GMAW voltage, GMAW wire feed speed, GTAW shielding gas flow rate, GTAW current and welding speed. The output variables analyzed were the penetration, the heat affected zone (HAZ), the width and the reinforcement. The experimental design was developed through a L27 experimental matrix. The Taguchi method was used to the experimental design and to statistic analysis of results. The experimental procedure was performed through the twenty-seven-specimen automated welding, with weld bead deposition over SAE 1045 Steel and weld geometry analysis by their macrography. The results techniques analysis, based on Taguchi method, were the analysis of variance, which indicated the probability of parameter influence on the output variances and the Signal-to-noise ratio, which presented the hybrid welding process optimization. Penetration was significantly influenced by GMAW wire feed speed, GMAW shielding gas type, GMAW voltage and welding speed. HAZ got influence from GMAW voltage, GMAW shielding gas type, welding speed and GTAW current. All parameters affected the width, but GMAW wire feed speed. The reinforcement was significantly influenced by GMAW wire feed speed and GTAW current. The process optimization was performed, so that to each output variable were submitted the parameters values that must be used, the optimization was confirmed through the evidence specimen welding.

**Keywords:** Hybrid welding. Optimization. Taguchi. GTAW. GMAW.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Desenho esquemático do processo de soldagem MIG/MAG .....                      | 14 |
| Figura 2 – Geometria do cordão em função do gás MIG/MAG.....                              | 18 |
| Figura 3 – Equipamentos utilizados na soldagem MIG/MAG .....                              | 18 |
| Figura 4 – Ilustração do processo de soldagem TIG.....                                    | 19 |
| Figura 5 – Equipamento utilizado na soldagem TIG.....                                     | 22 |
| Figura 6 – Processo de soldagem híbrida.....  | 22 |
| Figura 7 – Geometria de um cordão de solda de topo .....                                  | 25 |
| Figura 8 – Corpo de prova com sua geometria identificada .....                            | 33 |
| Figura 9 – Aparato experimental.....  | 35 |
| Figura 10 – Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a penetração .....                    | 38 |
| Figura 11 – Razão S/N da penetração da solda para os valores analisados.....              | 39 |
| Figura 12 – Corpo de prova otimizado em relação à penetração da solda.....                | 40 |
| Figura 13 – Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a zona afetada pelo calor (ZAC) ..... | 42 |
| Figura 14 – Razão S/N da ZAC para os valores analisados.....                              | 43 |
| Figura 15 – Corpo de prova otimizado em relação à zona afetada pelo calor (ZAC).....      | 44 |
| Figura 16 – Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a largura .....                       | 46 |
| Figura 17 – Razão S/N menor é melhor da largura para os valores analisados.....           | 47 |
| Figura 18 – Corpo de prova otimizado para a obtenção da menor largura de solda .....      | 48 |
| Figura 19 – Razão S/N maior é melhor da largura para os valores analisados .....          | 49 |
| Figura 20 – Corpo de prova otimizado para a obtenção da maior largura de solda.....       | 49 |
| Figura 21 – Efeito dos parâmetros de soldagem sobre o reforço .....                       | 51 |
| Figura 22 – Razão S/N do reforço para os valores analisados.....                          | 52 |
| Figura 23 – Corpo de prova otimizado em relação ao reforço da solda .....                 | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Parâmetros de soldagem com seus respectivos níveis .....              | 31 |
| Tabela 2 – Projeto de Experimentos ou Matriz Experimental .....                  | 32 |
| Tabela 3– Parâmetros que foram mantidos constantes em todos os experimentos..... | 33 |
| Tabela 4 – Valores obtidos nos experimentos para as variáveis de saída .....     | 36 |
| Tabela 5 – Análise de variância para a penetração da solda .....                 | 37 |
| Tabela 6 – Análise de variância para a zona afetada pelo calor (ZAC) .....       | 41 |
| Tabela 7 – Análise de variância para a largura da solda .....                    | 44 |
| Tabela 8 – Análise de variância para o reforço da solda .....                    | 50 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.1. JUSTIFICATIVA.....   | 12        |
| 1.2. OBJETIVOS.....   | 13        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....                                 | <b>14</b> |
| 2.1. PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.....                                | 14        |
| 2.1.1. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO MIG/MAG.....              | 15        |
| 2.1.2. INFLUÊNCIAS DE PARÂMETROS DO PROCESSO MIG/MAG .....            | 16        |
| 2.1.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO MIG/MAG .....              | 18        |
| 2.2. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.....                                    | 18        |
| 2.2.1. CARACTERÍSTICAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO TIG..... | 19        |
| 2.2.2. PARÂMETROS E VARIÁVEIS DO PROCESSO TIG .....                   | 20        |
| 2.2.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO TIG .....                  | 21        |
| 2.3. SOLDAGEM HÍBRIDA .....   | 22        |
| 2.3.1. HISTÓRICO DO PROCESSO DE SOLDAGEM HÍBRIDA .....                | 23        |
| 2.3.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO DE SOLDAGEM HÍBRIDA ..... | 23        |
| 2.3.3. SOLDAGEM HÍBRIDA TIG-MIG/MAG .....                             | 24        |
| 2.4. INFLUÊNCIAS DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG .....          | 24        |
| 2.4.1. CARACTERÍSTICAS E GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA .....           | 25        |
| 2.4.2. SOLDAGEM TIG- MAG EM TANDEM.....                               | 26        |
| 2.5. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS .....                          | 27        |
| 2.5.1. MÉTODO TAGUCHI .....   | 27        |
| <b>3. METODOLOGIA</b> .....   | <b>30</b> |
| 3.1. PROJETO DE EXPERIMENTOS.....                                     | 30        |
| 3.2. PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....              | 32        |
| 3.3. ANÁLISE DAS SOLDAS OBTIDAS E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO .....        | 33        |
| 3.4. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....                                   | 34        |
| <b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....                 | <b>36</b> |
| 4.1. PENETRAÇÃO DA SOLDA .....  | 37        |
| 4.2. ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC) .....                              | 40        |
| 4.3. LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA.....                                  | 44        |
| 4.4. REFORÇO DA SOLDA .....   | 50        |
| <b>5. CONCLUSÕES</b> .....  | <b>53</b> |
| <b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....                      | <b>54</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                               | <b>55</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por inovações e diferentes métodos de soldagem é crescente em virtude da globalização e da competitividade industrial, sendo que meios alternativos podem ser um diferencial em determinados processos. Destaca-se neste contexto a soldagem híbrida, a qual é uma tecnologia composta pela junção de diferentes tipos de soldagem, operando simultaneamente em uma mesma zona, um exercendo influências sobre outro, resultando em um novo processo com características próprias.

A utilização de métodos de soldagem híbrida, dá-se em casos em que processos de soldagem convencionais não satisfazem as necessidades de união de determinado produto, ou em casos onde se deseja aperfeiçoar a soldagem de materiais em relação à produtividade ou qualidade, desta forma, necessitando-se de diferentes soluções.

A problematização deste estudo consiste em detectar as influências dos parâmetros de soldagem híbrida TIG-MIG/MAG, sobre a geometria do cordão de solda e realizar a otimização do processo, desta forma, deseja-se responder a pergunta: “Quais são os parâmetros que devem ser utilizados em um processo de soldagem híbrida TIG-MIG/MAG para que sejam obtidas geometrias de solda otimizadas?”.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

O processo de soldagem híbrida possui relevância por possibilitar a junção de características de dois tipos de soldagem em um mesmo processo, com o alcance de diferentes utilidades e vantagens possibilitando, por exemplo, o aumento da penetração da solda, maior controle sobre a zona afetada pelo calor e aumento na velocidade de soldagem, o que caracteriza aumento de produtividade.

Justifica-se a otimização do processo de soldagem híbrida TIG-MIG/MAG por indicar quais são os parâmetros que devem ser utilizados para a obtenção das melhores geometrias do cordão de solda. A determinação da influência dos parâmetros de entrada sobre a geometria da solda é importante por proporcionar um alto nível de conhecimento do processo de soldagem híbrida, no que diz respeito às

suas variáveis e características, possibilitando a análise e escolha dos melhores parâmetros para a obtenção dos resultados esperados com o processo de soldagem híbrida.

## 1.2. OBJETIVOS

Este estudo teve por objetivo realizar a otimização de um processo de soldagem híbrida TIG-MIG/MAG, identificando a influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda e determinando os parâmetros que devem ser utilizados para a obtenção das melhores geometrias.

Os objetivos específicos seguidos para atingir o objetivo geral são:

- Embasamento teórico sobre soldagem híbrida e processos convencionais através da revisão da literatura;
- Construir um aparato experimental;
- Desenvolver o projeto de experimentos;
- Realizar o procedimento experimental de soldagem híbrida;
- Analisar a macrografia dos corpos de prova e fazer a coleta de dados;
- Identificar a influência dos parâmetros de entrada (tipo de gás de proteção MIG/MAG, tensão MIG/MAG, velocidade de alimentação do arame MIG/MAG, vazão do gás de proteção TIG, intensidade da corrente TIG e velocidade de soldagem) sobre as variáveis de saída (penetração, zona afetada pelo calor, largura e reforço);
- Otimizar o processo para cada variável de saída;
- Realizar teste final de soldagem, utilizando as configurações de parâmetros considerados ideais pela metodologia Taguchi para cada variável de saída, visando à comprovação da otimização realizada.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

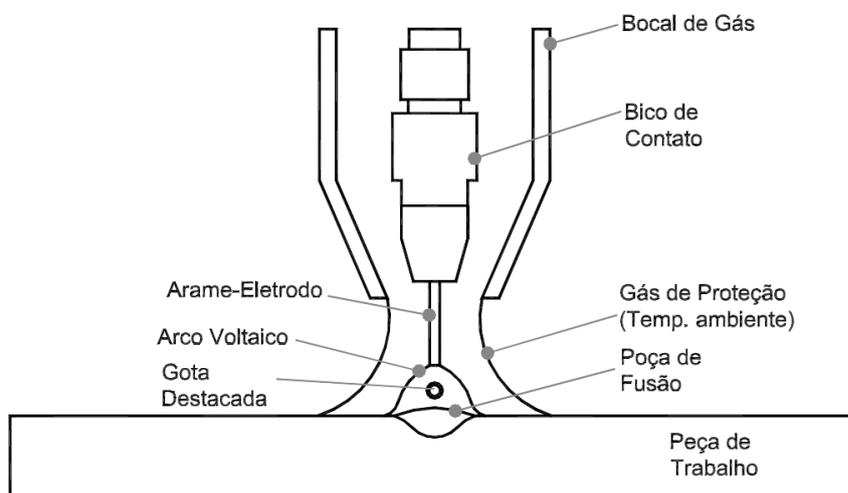
Desenvolve-se neste referencial teórico o embasamento a respeito de processos de soldagem MIG/MAG, soldagem TIG, soldagem híbrida, projetos de experimentos e método Taguchi.

### 2.1. PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG ou GMAW, ilustrado esquematicamente na Figura 1, baseia-se na utilização do calor gerado por um arco elétrico para fundir as peças e o arame eletrodo:

A soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW) é um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p. 233).

Figura 1 – Desenho esquemático do processo de soldagem MIG/MAG



Fonte: Oliveira, 2006, p. 7.

De acordo com a AWS (1991), os primeiros conceitos de GMAW foram introduzidos em meados de 1920, porém, apenas em 1948 o processo foi disponibilizado comercialmente. Inicialmente, o processo foi considerado como sendo, fundamentalmente, com alta densidade de corrente, pequeno diâmetro, eletrodo nu, utilizando um gás inerte para o arco de proteção. Na época, sua principal aplicação consistia na solda de alumínio. Subsequentemente, o processo

desenvolveu-se com operações em densidades de baixa corrente e corrente pulsada, a sua aplicação foi aumentada para uma ampla faixa de diferentes tipos de materiais, outro desenvolvimento foi o emprego de gases ativos e misturas de gases no processo.

No Brasil, utilizam-se bastante os termos MIG ou MAG, a diferença entre estas nomeações consiste na composição do gás de proteção utilizado no processo. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o processo é chamado de MIG (*"Metal Inert Gas"*), quando é usada uma proteção inerte (Ar/He) e o processo é conhecido como MAG (*"Metal Active Gas"*), quando o gás de proteção é ativo ou contém misturas com gases ativos (CO<sub>2</sub> ou misturas Ar/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>).

O processo GMAW permite a soldagem da maioria dos metais, tais como o aço carbono, aço de alta resistência, aço de baixa liga, aço inoxidável, alumínio, ligas de níquel, entre outros. Para cada soldagem devem ser analisados fatores como a escolha de um apropriado gás de proteção, eletrodo e variáveis de soldagem (AWS, 1991).

### **2.1.1. Vantagens e desvantagens do processo MIG/MAG**

De acordo com Wainer, Brandi e Mello (2004), as principais vantagens do processo MIG/MAG são: alta taxa de deposição, facilidade de automação, facilidade de operação da soldagem, possibilidade de ser executada em diversas posições, alta velocidade de soldagem (alta produtividade), pouca ou nenhuma formação de escória, metal de solda depositado com baixo teor de hidrogênio, penetração uniforme de raiz, soldagem com visibilidade total das peças de fusão, o eletrodo nu é alimentado continuamente.

O processo de soldagem MIG/MAG também possui limitações e desvantagens. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o processo possui como pontos negativos uma sensibilidade quanto à variação dos parâmetros de operação do arco de soldagem e a necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros para obtenção da solda desejada. Já Wainer, Brandi e Mello (2004), citam como limitações deste processo de soldagem, a velocidade de resfriamento, a grande emissão de raios ultravioletas, as projeções de gotas de metal líquido durante o processo e a dificuldade na realização da operação em locais de difícil acesso, devido à necessidade de o bocal ficar próximo ao metal a ser soldado. Outra

desvantagem do processo, de acordo com Harris (2009), consiste na necessidade, em muitos casos, de desenvolvimento de uma planta com ventilação, para a remoção dos gases provenientes da realização da soldagem, sendo necessário ao mesmo tempo haver extremo cuidado para evitar a perda de eficiência do gás de proteção.

### **2.1.2. Influências de parâmetros do processo MIG/MAG**

Quando se deseja obter um determinado tipo de união por soldagem, necessita-se um conhecimento a respeito dos parâmetros de soldagem e variáveis do processo. Os parâmetros influenciam nas diversas características das soldas, como qualidade, aparência, geometria do cordão, entre outros fatores (ALVES, 2009).

A corrente é o parâmetro que possui a maior influência sobre o modo de transferência do metal, taxa de deposição, penetração e reforço. A taxa de fusão varia, aproximadamente, de forma linear com a corrente. A energia de soldagem aumenta com o aumento da corrente. Em fontes de potência que tem a curva característica de tensão constante, a velocidade de alimentação do arame faz o controle da corrente (MACHADO, 1996).

De acordo com Alves (2009), aumentando a velocidade de alimentação (corrente de soldagem) e mantendo as outras variáveis constantes, haverá um aumento da profundidade de penetração, da taxa de deposição e das dimensões do reforço do cordão.

A velocidade com que a tocha se desloca ao longo da junta soldada tem influência na energia de soldagem, ou seja, na quantidade de calor que é cedido a peça. Aumentando a velocidade, altera-se a geometria do cordão de solda, diminuindo a penetração, a largura e o reforço do cordão. A diminuição excessiva da velocidade de soldagem pode ocasionar problemas metalúrgicos, devido à energia de soldagem elevada, além de diminuir a produtividade. Destaca-se ainda que excessivas velocidades de soldagem causam falta de fusão e de penetração (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Segundo Machado (1996), a tensão está diretamente ligada à energia de soldagem, sendo que um aumento de tensão ocasiona aumento da energia. A tensão é reconhecida como sendo o principal parâmetro para a regulação da

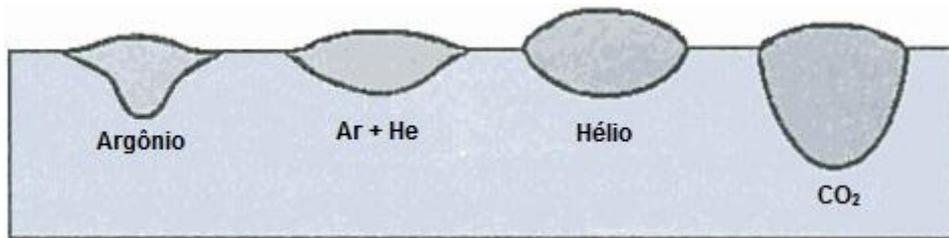
largura do cordão. Uma tensão baixa, para determinada corrente, provoca uma diminuição na largura e convexidade do cordão, bem como pode ocasionar porosidade e sobreposição. Já um aumento excessivo de tensão ocasiona porosidade, salpico e mordedura. A seleção da tensão deve ocorrer de acordo com a intensidade da corrente, gás de proteção, tipo de arame, além da geometria do cordão que se deseja obter. Na mesma linha de pensamento, Wainer, Brandi e Mello (2004), salientam que a tensão está associada ao comprimento do arco, ou seja, uma tensão baixa exige um pequeno comprimento do arco, conseqüentemente, uma pequena distância da ponta do arame até a poça de fusão.

A extensão do eletrodo, ou comprimento energizado do eletrodo é a distância entre a extremidade do bico de contato até a ponta do eletrodo onde ocorre o início do arco elétrico, um aumento desta distância provoca o aquecimento do arame e queda de tensão, isto ocasiona, sendo mantida a velocidade de alimentação, a diminuição da quantidade necessária de corrente para fundir o arame (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O tipo de gás de proteção também apresenta influência no processo de soldagem MIG/MAG. O gás inerte como o argônio tem como característica o arco de forte intensidade e maior energia de soldagem, caracterizado pela transferência de metal em curto circuito e aerossol. Em misturas de argônio com  $\text{CO}_2$ , a tenacidade do metal de solda decai com o aumento de  $\text{CO}_2$  na mistura, a transferência pode ser em curto circuito ou até em aerossol. Utilizando gases ativos como o  $\text{CO}_2$  puro, as características obtidas são uma alta taxa de deposição, baixa tenacidade e risco de porosidade, a transferência ocorre nos modos curto circuito e globular (MACHADO, 1996).

Marques, Modenesi e Bracarense (2009), destacam que o tipo de gás de proteção influencia também a penetração, a largura, a velocidade máxima de soldagem, a tendência de mordeduras e o custo do processo. A Figura 2 apresenta um comparativo entre as geometrias dos cordões com diferentes tipos de gases, onde percebe-se que as maiores penetrações tendem a ser obtidas com a utilização do  $\text{CO}_2$  como gás de proteção.

Figura 2 – Geometria do cordão em função do gás MIG/MAG

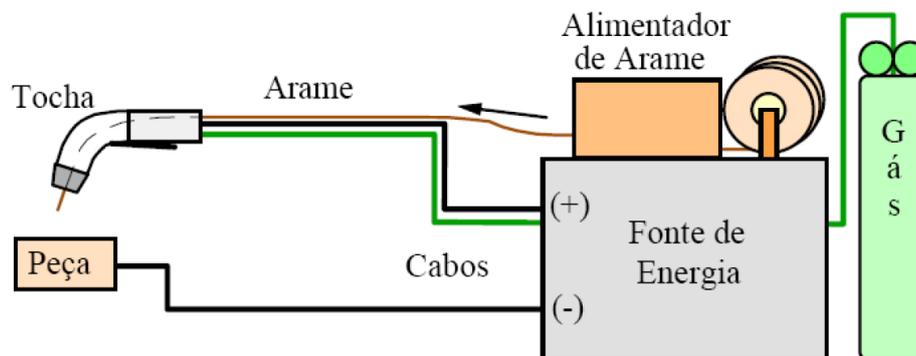


Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, 2009, p. 252.

### 2.1.3. Equipamentos utilizados no processo MIG/MAG

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009) os equipamentos básicos utilizados no processo de soldagem MIG/MAG, ilustrados na Figura 3, são: fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem, fonte de gás protetor, cabos e mangueiras.

Figura 3 – Equipamentos utilizados na soldagem MIG/MAG



Fonte: Adaptado de Marques; Modenesi; Bracarense, 2009, p. 244.

## 2.2. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

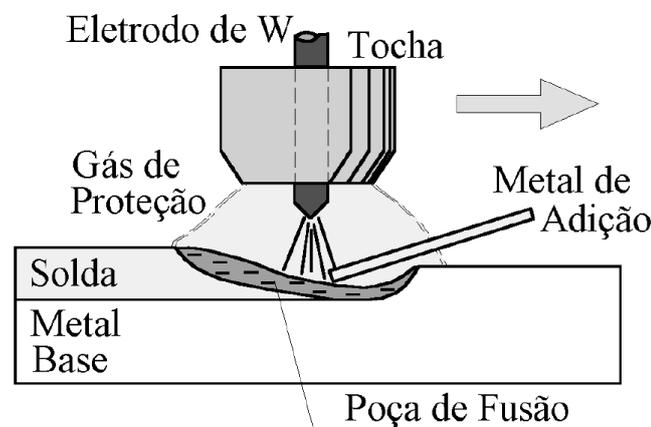
O processo TIG (*"Tungsten Inert Gas"*) ou GTAW foi patenteado no final dos anos 20, sendo utilizado comercialmente apenas em 1948, para a soldagem de ligas de magnésio. Atualmente, o processo é utilizado, geralmente, em soldagem de ligas de alumínio, magnésio, titânio, aço inoxidável, entre outros (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco

elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a unir. A proteção da poça de fusão e do arco contra contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p. 205).

Marques, Modenesi e Bracarense (2009), destacam que o processo de soldagem TIG pode ser realizado sem a adição de material (autógeno) ou adicionando material diretamente na poça de fusão. O sistema de soldagem TIG é esquematicamente ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Ilustração do processo de soldagem TIG



**Fonte:** Adaptado de Marques; Modenesi; Bracarense, 2009, p. 205.

Machado (1996) acrescenta que, o eletrodo de tungstênio que gera o arco elétrico com a peça a ser soldada pode ser puro ou composto de outros metais ou óxidos.

### 2.2.1. Características, vantagens e desvantagens do processo TIG

Uma das principais características do processo de soldagem TIG é o controle da energia que é transferida para a peça durante o processo de soldagem, ocorre através do controle independente do operador com a fonte de calor, isso torna o processo adequado para soldagens de peças com espessuras pequenas. O soldador possui uma boa visibilidade durante o processo devido à ausência de escoria. O arco elétrico é bastante estável (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Delgado (2000), aponta como uma das principais vantagens da soldagem TIG, o fato de que este processo permite que soldas de qualidade elevada sejam

realizadas na maioria dos metais e ligas soldáveis. Outro ponto consiste nas soldas serem limpas, ou seja, isentas de respingos, livres de resíduos, frequentemente não exigindo tratamentos pós-soldagem.

A soldagem TIG se caracteriza pela alta qualidade apresentada em ligas sofisticadas:

O processo de soldagem a arco TIG (ou GTAW) é muito usado na soldagem de materiais mais sofisticados, incluindo aços inoxidáveis e ligas de metais reativos, e quando um bom acabamento e uma elevada qualidade das soldas são requeridos. Frequentemente, o processo é aplicado de forma mecanizada ou automatizada (MODENESI, 2013, p. 287).

Modenesi (2013), aponta também uma limitação da soldagem TIG em sua forma usual de utilização, este ponto consiste na máxima espessura soldável, como um caso específico, cita-se a solda em juntas sem chanfro, nas soldas TIG a taxa de deposição é geralmente menor do que as taxas obtidas em processos a arco com o eletrodo consumível.

Segundo Schwedersky *et al.* (2011), o processo TIG é classificado popularmente como um processo de baixa produtividade, pelo fato de ser considerado um processo com baixa velocidade de soldagem. Esta classificação ocorre principalmente, devido aos problemas apresentados quando se deseja o processo autógeno com velocidade de solda elevada, sendo que dessa forma, a corrente de soldagem também deve ser elevada para manter o tamanho do cordão.

Outro fator negativo deste processo é o seu elevado custo de operação, fazendo com que o mesmo seja utilizado apenas em casos de necessidades especiais (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

### **2.2.2. Parâmetros e variáveis do processo TIG**

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a corrente de soldagem tem grande influência sobre a geometria do cordão de solda e sobre a energia de soldagem. Quanto maior é a corrente utilizada, maior é a energia de soldagem, a penetração e a largura do cordão de solda resultante do processo. Em casos de solda com adição de metal, o reforço do cordão possui uma tendência de diminuir com o aumento da corrente.

O tipo de corrente mais utilizada na soldagem TIG é a corrente contínua com eletrodo na polaridade negativa. Neste caso, 30% do calor gerado é produzido no

eletrodo e 70% é produzido na peça, ocasionando uma maior penetração, com uma poça de fusão estreita e mais profunda. A corrente contínua com eletrodo positivo resulta em uma penetração pequena e superficial, já a corrente alternada ocasiona uma penetração intermediária (MACHADO, 1996).

O aumento do comprimento do arco (distância entre a ponta do eletrodo e a peça de trabalho) gera aumento da tensão, para uma determinada corrente e gás de proteção. Quanto maior for o comprimento do arco, maior será a largura do cordão, porém, a penetração será menor. Arcos muito longos ou muito curtos possuem tendência de serem instáveis. Define-se que o comprimento do arco não deve ultrapassar um valor de 1,5 vezes o diâmetro do eletrodo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

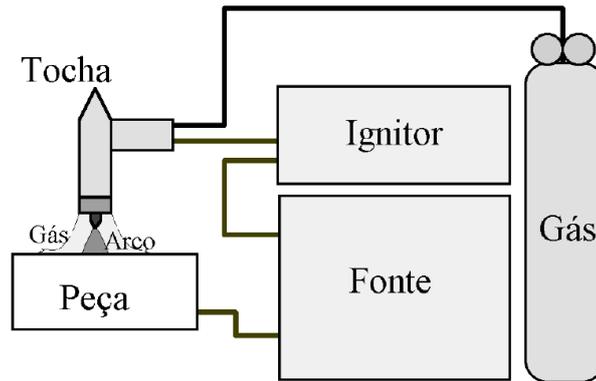
A velocidade de soldagem é proporcional à eficiência e à produtividade do processo. Com o aumento da velocidade de soldagem, a tendência é de que ocorra a diminuição da penetração e largura do cordão. O aumento da velocidade proporciona também uma diminuição da energia de soldagem. Na soldagem com adição de metal, o aumento de velocidade tende a diminuir o reforço do cordão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A vazão do gás de proteção possui grande influência na qualidade da solda resultante, se a operação tiver uma vazão muito baixa, a proteção será insuficiente, podendo ocasionar a formação de porosidades e a oxidação do cordão de solda, a operação com alta vazão, em geral não apresenta problemas, porém, possui um custo elevado, vazões excessivamente elevadas podem causar turbulência no fluxo do gás, podendo resultar também em uma proteção insuficiente (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

### **2.2.3. Equipamentos utilizados no processo TIG**

O equipamento básico utilizado na soldagem TIG, ilustrado na Figura 5, é composto por uma fonte de energia, uma tocha de soldagem, uma fonte de gás protetor, um dispositivo de abertura do arco de soldagem, cabos e mangueiras. Além dos itens descritos, diversos equipamentos auxiliares podem ser utilizados na soldagem, seja ela manual ou automatizada, visando permitir uma facilidade de operação, melhor controle do processo, maior produtividade, entre outros benefícios (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 5 – Equipamento utilizado na soldagem TIG



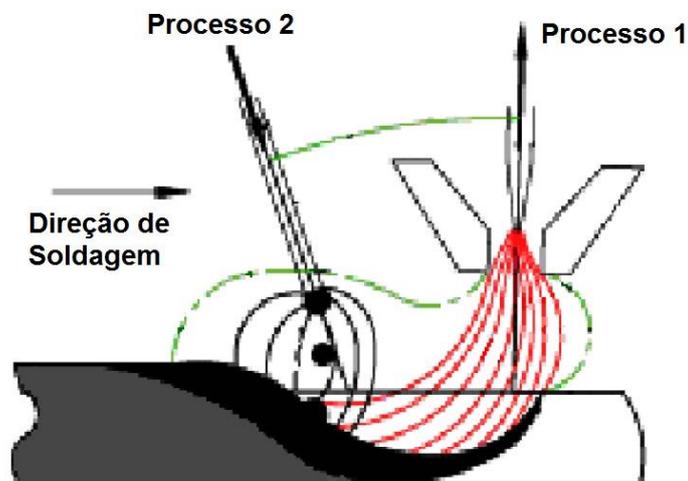
**Fonte:** Marques; Modenesi; Bracarense, 2009, p. 207.

### 2.3. SOLDAGEM HÍBRIDA

Define-se soldagem híbrida como o acoplamento de dois tipos de soldagem em um único processo, neste caso, os dois processos empregados agem simultaneamente em uma mesma zona e um apresenta mútua influência sobre o outro. Esta combinação resulta em inerentes características e recursos, aumentando as áreas de aplicação do processo de soldagem (RAYES; WALZ; SEPOLD, 2004).

Campana *et al.* (2007), destaca que a soldagem híbrida consiste em duas diferentes tecnologias de soldagem acopladas juntas. Ilustra-se na Figura 6 um processo de soldagem híbrida, composto pela junção de dois tipos de soldagem.

Figura 6 – Processo de soldagem híbrida



**Fonte:** Adaptado de Dykhno; Davis, 2006.

Reutzel, Sullivan e Mikesic (2006), destacam a transição dos processos híbridos dos laboratórios para as linhas de produção, enfatizando que atualmente a união de diferentes tipos de soldagem em um mesmo processo não existe apenas em testes de laboratórios, mas também no meio industrial, reduzindo custos e aumentando a produtividade e a qualidade de processos de soldagem.

### **2.3.1. Histórico do processo de soldagem híbrida**

Segundo Messler (2004), o processo de soldagem híbrida apresentou um desenvolvimento a partir dos anos de 1970. A seguir, apresenta-se um breve histórico do desenvolvimento do processo de soldagem híbrida ao longo dos anos:

- 1972 – Processo de soldagem plasma com MIG/MAG e TIG com MIG/MAG;
- 1978 – Soldagem com duplo feixe de elétrons;
- 1979 – Processo de soldagem LASER com TIG;
- 1987 – Soldagem com duplo feixe de LASER;
- 1988 – Processo de soldagem LASER com TIG ou com MIG/MAG;
- 1991 – Processo de soldagem LASER com MIG;
- 1998 – Processo de soldagem LASER com Plasma;
- 2001 – Processo de soldagem LASER de baixa potência utilizando dióxido de carbono com soldagem TIG;
- 2002 - Soldagem por Fricção (FSW) assistida por LASER.

### **2.3.2. Vantagens e desvantagens do processo de soldagem híbrida**

Segundo Nielsen (2011) as vantagens da utilização do processo de soldagem híbrida são: aumento na penetração do cordão, aumento na velocidade de soldagem, redução nas taxas de calor (com uma estreita zona afetada pelo calor) e melhor energia acoplada ao sistema.

Os processos híbridos são interessantes, principalmente, em casos em que há limitações nas tolerâncias de determinado projeto ou produto, sendo que as mesmas não podem ser cumpridas utilizando-se apenas um processo (NIELSEN, 2011).

Da mesma forma que o processo apresenta vantagens, o mesmo possui algumas desvantagens e limitações. Além do elevado custo de operação, o

processo é complexo e com mais variáveis quando comparado a processos individuais, possuindo parâmetros adicionais como a distância e ângulo entre as tochas dos dois diferentes tipos de soldagem, a relação entre as potências e a influência que os parâmetros podem apresentar entre si (NIELSEN, 2011).

### **2.3.3. Soldagem híbrida TIG-MIG/MAG**

O processo híbrido de soldagem TIG-MIG/MAG ou GTAW-GMAW consiste na combinação dos processos TIG e MIG/MAG em um único processo de soldagem. Geralmente, através da operação automática, uma unidade eletrônica é quem controla as fontes de alimentação do processo híbrido, sendo possível, desta forma, o processo ser programado para a utilização apenas de TIG ou MIG/MAG, ou a combinação dos dois processos simultaneamente (DYKHNO; DAVIS, 2006).

Pesquisas recentes tem revelado que o processo híbrido pode duplicar o desempenho da soldagem em relação ao processo convencional plasma ou TIG, utilizando menos energia, podendo também aumentar a velocidade de soldagem em determinadas aplicações, quando comparado ao processo MIG/MAG (DYKHNO; DAVIS, 2006).

O processo híbrido TIG-MIG/MAG geralmente funciona através de uma tocha de soldagem TIG percorrendo a peça conduzindo o processo, ou seja, à frente da tocha MIG/MAG, aquecendo e formando um “*keyhole*” no material de origem, subsequentemente, surge a tocha MIG/MAG seguindo o processo, preenchendo o “*keyhole*” criado pelo processo TIG, adicionando material através do arco elétrico e arame eletrodo. Resumidamente, o processo consiste em um arco TIG aquecendo e abrindo um vão na peça para a penetração profunda e o processo MIG/MAG depositando material com alta eficiência para completar o processo (DYKHNO; DAVIS, 2006).

## **2.4. INFLUÊNCIAS DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG**

Nesta seção, apresentam-se inicialmente as características da geometria da solda e posteriormente analisam-se algumas influências dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão de solda, através de pesquisa já desenvolvida com a combinação dos processos TIG e MIG/MAG.

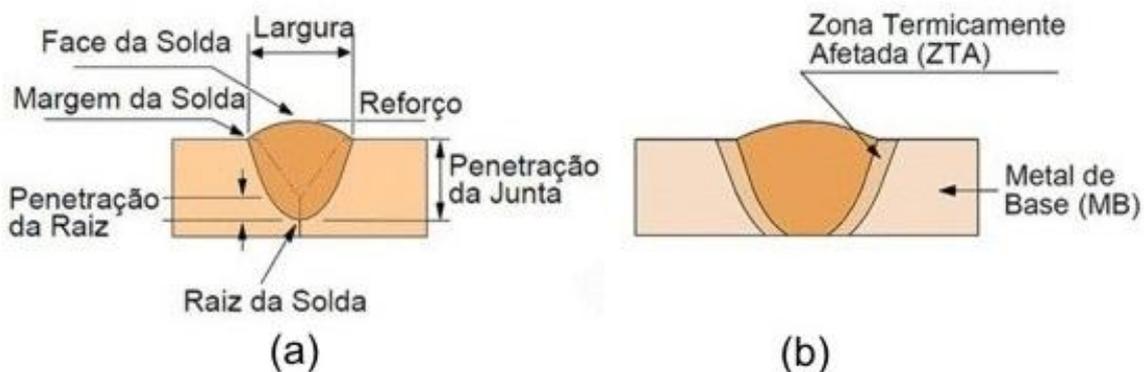
### 2.4.1. Características e geometria do cordão de solda

Ilustra-se na Figura 7, a geometria de uma solda de topo, onde é possível observar as variáveis de saída consideradas neste estudo (penetração, largura, reforço e zona afetada pelo calor ou ZAC).

Na Figura 7(a) são ilustrados, dentre outros fatores, a penetração, a largura e o reforço da solda. A penetração consiste na distância em que a fusão estende-se no metal base medida perpendicularmente a superfície do metal base, ou seja, é a distância da superfície do metal ao ponto em que a fusão termina. O reforço é a altura atingida pelo cordão medida perpendicularmente a partir da superfície do metal base, ou seja, é o excesso de metal de adição que fica acima da superfície do metal base. A largura do cordão de solda consiste no comprimento da largura da zona fundida medida paralelamente na superfície do metal base (AWS, 1991).

A zona afetada pelo calor (ZAC) ou zona termicamente afetada (ZTA), ilustrada na Figura 7(b), define-se como sendo a zona do metal de base que tem suas propriedades alteradas pela energia ou calor do processo de soldagem, nesta zona não ocorre fusão, ela apenas tem as suas características alteradas devido a fatores como a alta temperatura alcançada, a energia da soldagem e as taxas de aquecimento e resfriamento (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 7 – Geometria de um cordão de solda de topo



Fonte: Adaptado de Marques; Modenesi; Bracarense, 2009, p. 33.

### 2.4.2. Soldagem TIG- MAG em tandem

Segundo AWS (2002), a soldagem em tandem consiste no arranjo geométrico de eletrodos onde a linha dos arcos de soldagem é paralela à direção de soldagem do processo.

Teixeira (2011), realizou estudos com um processo de soldagem TIG–MAG em tandem. O estudo consistiu em três etapas de soldagem, MAG e TIG de forma individual e a soldagem em tandem envolvendo os dois tipos de soldagem em um único processo. Através da utilização do método fatorial fracionado, a pesquisa buscou apresentar as influências dos parâmetros de soldagem na geometria final do cordão de solda, as variáveis de saída analisadas foram: área, penetração, largura e reforço do cordão de solda.

Segundo Teixeira (2011), foram soldados vinte corpos de prova com variações de parâmetros e após foi realizada a análise da macrografia dos mesmos. Os resultados obtidos, analisando o processo em tandem, foram os seguintes:

- Área do cordão: influenciada pela velocidade de alimentação do arame, tensão MAG e velocidade de soldagem. A área atingiu um valor máximo quando a velocidade de alimentação do arame ou a tensão MAG estiveram nos seus valores máximos, ou quando a velocidade de soldagem esteve em seu nível mínimo;

- Penetração: os fatores significativos foram a velocidade de alimentação do arame MAG, a corrente TIG, a tensão MAG, a velocidade de soldagem, as interações que a velocidade de soldagem exerce com a alimentação de arame e com a tensão MAG. As maiores médias de penetração ocorreram com os valores máximos de velocidade do arame e os valores mínimos de velocidade de soldagem, já as menores penetrações foram obtidas quando a velocidade de alimentação do arame foi mínima e a velocidade de soldagem esteve em seu nível máximo. Nota-se também que a maior penetração ocorreu com a interação da tensão MAG e a velocidade de soldagem, quando ambas estiveram com os mínimos valores testados, porém, para esta mesma interação, a menor penetração ocorreu com a tensão MAG e a velocidade de soldagem em seus níveis mínimo e máximo, respectivamente.

- Largura: os fatores significativos foram a tensão MAG e a velocidade de soldagem. Obteve-se uma máxima largura com a máxima tensão e a mínima velocidade de soldagem;

- Reforço: a altura do reforço foi influenciada pela tensão MAG, a maior altura de reforço foi obtida com a menor tensão MAG.

## 2.5. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

O experimento projetado consiste em um teste ou uma série de testes que conduzem a alterações nas variáveis de entrada do sistema, possibilitando a identificação das causas de melhorias nas variáveis de saída. Desta forma, identificando as possíveis causas de resultados indesejados em produtos e processos, torna-se possível a praticabilidade de ações eficazes de melhoria (VASCONCELOS, 2004).

Segundo Vasconcelos (2004), o planejamento e a análise dos experimentos tem o objetivo de determinar os fatores e as variáveis de entrada que apresentam maiores influências nos resultados e na qualidade do processo.

Colombari (2004), aponta uma forma de estruturação do planejamento e projeto de experimentos, dividindo-o nas seguintes etapas: conhecer o problema; definir os fatores e seus níveis de controle; selecionar as variáveis de resposta; escolher o projeto ou matriz experimental; realizar o experimento; analisar os dados; realizar a conclusão do trabalho.

Quando se deseja analisar o efeito que diversos fatores provocam nas respostas dos experimentos, recomenda-se a utilização de técnicas clássicas de planejamento, como o planejamento fatorial completo, o planejamento fatorial fracionado e o método Taguchi (COLOMBARI, 2004).

### 2.5.1. Método Taguchi

O método Taguchi é uma abordagem padronizada que busca determinar a melhor combinação de variáveis de entrada na realização de determinado processo. Este método utiliza um projeto especial de matrizes ortogonais para estudar a influência dos parâmetros de entrada em relação às variáveis de saída, com um pequeno número de experimentos. A principal vantagem do método Taguchi consiste na preservação de esforços na condução dos experimentos, reduzindo tempo e custos de experimentos, e identificando rapidamente os fatores significantes do estudo (DESHMUKH; SORTE, 2013).

O método Taguchi proporciona uma eficiente e sistemática maneira de aperfeiçoar projetos de desempenho, qualidade e custo. A otimização dos parâmetros de processos é o passo fundamental para atingir alta qualidade sem aumentar os custos do processo. Esta otimização proporcionada pelo método Taguchi, consiste na identificação dos parâmetros que devem ser utilizados para se atingir as características ideais em determinado processo (DESHMUKH; SORTE, 2013).

Segundo Moita (2007), o método Taguchi avalia o desvio da característica de qualidade das respostas utilizando uma medida estatística denominada razão de sinal de ruído (S/N). O cálculo do valor de S/N é realizado através de equações que variam de acordo com a característica de qualidade escolhida no processo. De acordo com Deshmukh e Sorte (2013), quanto maior for a razão S/N, melhor é o nível de qualidade que o processo está atingindo, ou seja, a otimização do processo é alcançada com a maior razão S/N.

Segundo Alves (2009), ao realizar a otimização de determinado processo, as características de qualidade devem ser escolhidas para cada resposta (variável de saída). As condições que podem ser escolhidas são:

- Menor é melhor: utilizado quando se deseja minimizar o valor da resposta. Para esta característica, a razão S/N é definida pela Equação 1;
- Nominal é melhor: escolhido quando deseja-se obter o resultado em torno de um valor nominal. Para esta característica, a razão S/N é definida pela Equação 2;
- Maior é melhor: quando se tem o objetivo de obter o maior resultado. Para esta característica, a razão S/N é definida pela Equação 3.

$$S / N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

$$S / N = 10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

$$S / N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3)$$

Onde:

$S/N$  = razão Sinal/Ruído;

$n$  = número observações;

$y_i^2$  = quadrado do valor da observação;

$\mu^2$  = valor médio ao quadrado;

$\sigma^2$  = variância.

A análise de variância ou ANOVA é uma ferramenta estatística que indica as influências dos parâmetros de entrada sobre as variáveis de saída ou respostas. Nesta análise, o valor de F indica o tamanho da influência de cada parâmetro sobre a resposta, quanto maior for o valor de F, maior são os efeitos do parâmetro sobre o resultado final. Já o valor de P indica a probabilidade de que determinado parâmetro apresente influências sobre a resposta, ou seja, é o grau de certeza de que o parâmetro está influenciando os resultados, geralmente afirma-se que determinado parâmetro apresenta influências significativas sobre a resposta quando o valor de P for igual ou inferior a 0,05, isto indica uma confiabilidade igual ou superior a 95% (ANAWA; OLABI, 2008).

### **3. METODOLOGIA**

Neste subtítulo são apresentados os métodos e técnicas adotadas e os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste estudo.

#### **3.1. PROJETO DE EXPERIMENTOS**

Inicialmente foram definidas quais seriam as características da geometria do cordão de solda que seriam analisadas. Delimitou-se pelo estudo envolvendo as seguintes variáveis de saída: penetração da solda, área da zona afetada pelo calor (ZAC), largura da solda e reforço da solda. As características desejadas consistiram na obtenção de uma maior penetração e menor reforço, já para a largura da solda, planejou-se a otimização para uma maior largura e para uma menor largura, fazendo com que este estudo abrangesse os dois extremos para esta característica, já para a zona afetada pelo calor (ZAC) desejou-se a menor área possível.

Através de embasamento teórico definiram-se os parâmetros que seriam variados neste estudo, os parâmetros escolhidos foram: tipo de gás de proteção (MIG/MAG), tensão (MIG/MAG), velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG), intensidade da corrente (TIG), vazão do gás de proteção (TIG) e velocidade de soldagem.

Para a definição dos três níveis que seriam variados em cada parâmetro de soldagem, realizaram-se testes com as soldagens TIG e MIG/MAG de forma individual. A Tabela 1 apresenta os parâmetros que foram variados, bem como as suas unidades de medida e seus respectivos níveis de variação.

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem com seus respectivos níveis

| Parâmetro  | Unidade                   | Notação | Nível | Valor                     |
|--|---------------------------|---------|-------|---------------------------|
| Tipo de gás de proteção<br>(MIG/MAG)               | -                         | -       | 1     | Argônio                   |
|  |                           |         | 2     | CO <sub>2</sub> + Argônio |
|  |                           |         | 3     | CO <sub>2</sub>           |
| Tensão<br>(MIG/MAG)                                | Volts                     | V       | 1     | 25                        |
|  |                           |         | 2     | 27,5                      |
|  |                           |         | 3     | 30                        |
| Velocidade de alimentação do<br>arame<br>(MIG/MAG) | Metros por<br>minuto      | m/min   | 1     | 7                         |
|  |                           |         | 2     | 8                         |
|  |                           |         | 3     | 9                         |
| Vazão do gás de proteção<br>(TIG)                  | Litros por minuto         | l/min   | 1     | 10                        |
|  |                           |         | 2     | 12,5                      |
|  |                           |         | 3     | 15                        |
| Intensidade da corrente<br>(TIG)                   | Ampères                   | A       | 1     | 150                       |
|  |                           |         | 2     | 175                       |
|  |                           |         | 3     | 200                       |
| Velocidade de soldagem                             | Milímetros por<br>segundo | mm/s    | 1     | 10                        |
|  |                           |         | 2     | 12,5                      |
|  |                           |         | 3     | 15                        |

O Projeto de Experimentos foi desenvolvido no software Minitab 16. Definiu-se a utilização de matriz experimental L27, que consiste na soldagem de vinte e sete corpos de prova com variações múltiplas de parâmetros. Apresenta-se na Tabela 2 a matriz experimental, com a ordem de experimentos e respectivos valores para cada parâmetro de soldagem.

Tabela 2 – Projeto de Experimentos ou Matriz Experimental

| Ordem | Tipo de gás (MIG/MAG)    | Tensão ou voltagem (MIG/MAG) | Velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) | Vazão do gás (TIG) | Intensidade da corrente (TIG) | Velocidade de soldagem |
|-------|--------------------------|------------------------------|--|--------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1     | Argônio                  | 25                           | 7  | 10                 | 150                           | 10                     |
| 2     | Argônio                  | 25                           | 7  | 10                 | 175                           | 12,5                   |
| 3     | Argônio                  | 25                           | 7  | 10                 | 200                           | 15                     |
| 4     | Argônio                  | 27,5                         | 8  | 12,5               | 150                           | 10                     |
| 5     | Argônio                  | 27,5                         | 8  | 12,5               | 175                           | 12,5                   |
| 6     | Argônio                  | 27,5                         | 8  | 12,5               | 200                           | 15                     |
| 7     | Argônio                  | 30                           | 9  | 15                 | 150                           | 10                     |
| 8     | Argônio                  | 30                           | 9  | 15                 | 175                           | 12,5                   |
| 9     | Argônio                  | 30                           | 9  | 15                 | 200                           | 15                     |
| 10    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 25                           | 8  | 15                 | 150                           | 12,5                   |
| 11    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 25                           | 8  | 15                 | 175                           | 15                     |
| 12    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 25                           | 8  | 15                 | 200                           | 10                     |
| 13    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 27,5                         | 9  | 10                 | 150                           | 12,5                   |
| 14    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 27,5                         | 9  | 10                 | 175                           | 15                     |
| 15    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 27,5                         | 9  | 10                 | 200                           | 10                     |
| 16    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 30                           | 7  | 12,5               | 150                           | 12,5                   |
| 17    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 30                           | 7  | 12,5               | 175                           | 15                     |
| 18    | CO <sub>2</sub> +Argônio | 30                           | 7  | 12,5               | 200                           | 10                     |
| 19    | CO <sub>2</sub>          | 25                           | 9  | 12,5               | 150                           | 15                     |
| 20    | CO <sub>2</sub>          | 25                           | 9  | 12,5               | 175                           | 10                     |
| 21    | CO <sub>2</sub>          | 25                           | 9  | 12,5               | 200                           | 12,5                   |
| 22    | CO <sub>2</sub>          | 27,5                         | 7  | 15                 | 150                           | 15                     |
| 23    | CO <sub>2</sub>          | 27,5                         | 7  | 15                 | 175                           | 10                     |
| 24    | CO <sub>2</sub>          | 27,5                         | 7  | 15                 | 200                           | 12,5                   |
| 25    | CO <sub>2</sub>          | 30                           | 8  | 10                 | 150                           | 15                     |
| 26    | CO <sub>2</sub>          | 30                           | 8  | 10                 | 175                           | 10                     |
| 27    | CO <sub>2</sub>          | 30                           | 8  | 10                 | 200                           | 12,5                   |

### 3.2. PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

As soldagens foram realizadas através da fusão da superfície dos corpos de prova, ou seja, depositando cordões de solda sobre a superfície das chapas de Aço SAE 1045.

A fim de eliminar a presença de sujeiras, impurezas ou possíveis locais com oxidação sobre a superfície dos corpos de prova, realizou-se a limpeza da superfície dos mesmos.

As soldagens dos corpos de prova foram efetuadas utilizando um sistema de deslocamento automático, no qual as peças soldadas eram movimentadas a velocidade constante. Um dispositivo de controle de acionamento simultâneo das tochas foi utilizado para o acionamento das soldagens TIG e MIG/MAG.

Alguns parâmetros e características de processo foram mantidos constantes em todos os experimentos, na Tabela 3 são apresentados os parâmetros e características constantes e seus respectivos valores ou descrições.

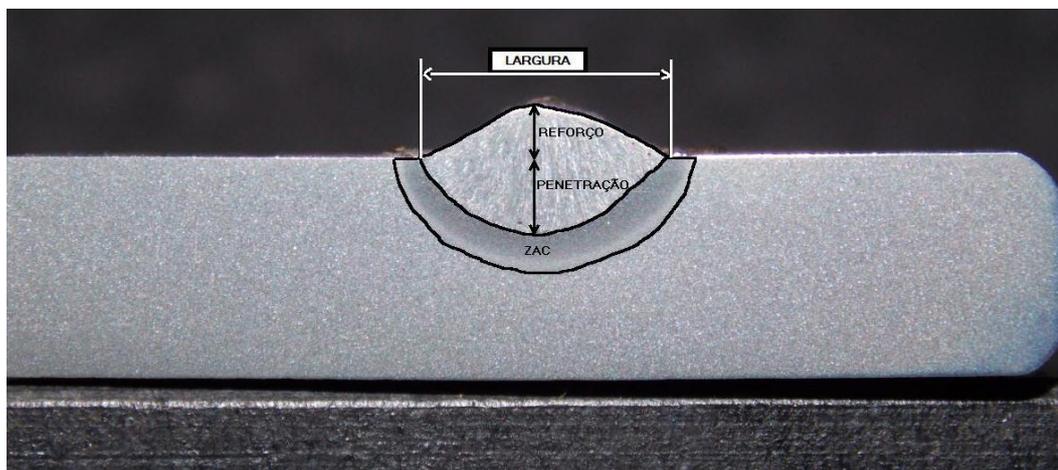
Tabela 3– Parâmetros que foram mantidos constantes em todos os experimentos

| Parâmetros e características constantes                              | Valor ou descrição |
|--|--------------------|
| Vazão do gás de proteção MIG/MAG (l/min)                             | 12,5               |
| Tipo de gás de proteção TIG  | Argônio            |
| Posição da tocha de soldagem TIG em relação à superfície da peça     | 90°                |
| Posição da tocha de soldagem MIG/MAG em relação à superfície da peça | 45°                |
| Comprimento do arco de soldagem TIG (mm)                             | 3                  |
| Distância do bico de contato MIG/MAG em relação à peça (mm)          | 20                 |

### 3.3. ANÁLISE DAS SOLDAS OBTIDAS E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

As soldas obtidas foram analisadas em laboratório, onde a macrografia das amostras foi revelada. Os corpos de prova foram seccionados transversalmente, lixados, polidos e tiveram a sua macrografia revelada através de ataque químico com Nital (5%). As imagens das macrografias foram capturadas com uma câmera fotográfica. A Figura 8 apresenta a imagem de um corpo de prova após o ataque químico, com os fatores analisados neste estudo devidamente identificados.

Figura 8 – Corpo de prova com sua geometria identificada



A medição da geometria (penetração, largura, reforço e zona afetada pelo calor) das soldas foi efetuada através do software ImageJ.

A análise dos resultados foi realizada com o software Statistica. Destaca-se que, quanto aos efeitos dos parâmetros sobre as variáveis de saída, foram consideradas confiáveis as influências dos parâmetros que em sua análise de variância, apresentaram um valor de P igual ou inferior a 0,05 (valor crítico considerado), o que indica um grau de certeza igual ou superior a 95% em relação ao que está sendo afirmado.

Os resultados foram validados executando-se novamente o processo de soldagem com os parâmetros considerados ideais, realizou-se a análise da macrografia e as medições da geometria do cordão otimizado.

### 3.4. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Todas as etapas de procedimentos experimentais bem como coleta de dados foram realizadas nos laboratórios da Fahor, a qual disponibilizou toda a estrutura e recursos necessários para a realização deste trabalho.

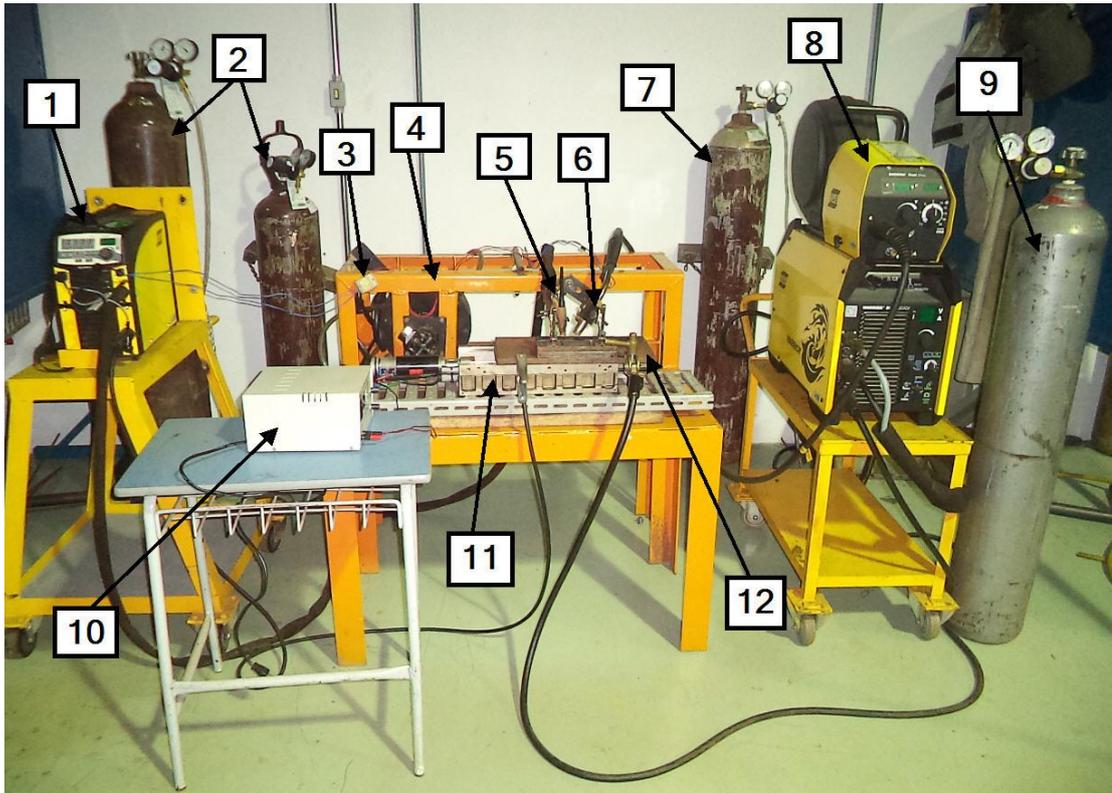
Para a realização do procedimento experimental foram utilizados 27 corpos de prova de Aço SAE 1045, com espessura de 7,94 mm, largura de 38 mm e comprimento de 200 mm.

O equipamento de soldagem TIG utilizado foi uma fonte de soldagem TIG 2200i AC/DC. Para a soldagem MIG/MAG, utilizou-se uma fonte de soldagem Warrior 500i CC/CV.

Para o processo de soldagem TIG, utilizou-se o gás argônio em todos os experimentos. No processo de soldagem MIG/MAG, o gás de proteção foi um dos fatores variados no decorrer dos experimentos, sendo utilizados os gases argônio, dióxido de carbono e o gás ATAL 21, composto pela mistura entre argônio e dióxido de carbono (79% Ar e 21% CO<sub>2</sub>).

O aparato experimental utilizado, ilustrado na Figura 9, compõe-se pelos seguintes equipamentos: (1) Fonte de soldagem TIG; (2) Gás argônio; (3) Dispositivo de acionamento das tochas; (4) Estrutura do dispositivo com fixadores de tochas; (5) Tocha de soldagem TIG; (6) Tocha de soldagem MIG/MAG; (7) Gás Atal 21 (Argônio+CO<sub>2</sub>); (8) Fonte de soldagem MIG/MAG; (9) Gás CO<sub>2</sub>; (10) Fonte de energia; (11) Dispositivo de movimentação automática; (12) Suporte para as peças.

Figura 9 – Aparato experimental



O eletrodo consumível utilizado no processo MIG/MAG foi o AWS ER70S-6, com diâmetro de 1 mm. O eletrodo não consumível utilizado no processo TIG foi eletrodo de tungstênio AWS EWTh-2, diâmetro de 2,4 mm, com ângulo na ponta de 60°.

Para a análise das amostras utilizou-se os seguintes materiais e equipamentos: máquina de corte e discos de corte (para o seccionamento das amostras), lixas d'água (para o lixamento), máquina rotacional e alumina (para o polimento), Nital 5% (para o ataque químico e revelação das macrografias).

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 4 são apresentados os valores encontrados para as variáveis de saída, as quais foram: penetração, zona afetada pelo calor (ZAC), largura e reforço.

Tabela 4 – Valores obtidos nos experimentos para as variáveis de saída

| Ordem Experimental | Penetração (mm) | ZAC (mm <sup>2</sup> ) | Largura (mm) | Reforço (mm) |
|--------------------|-----------------|------------------------|--------------|--------------|
| 1                  | 1,782           | 22,274                 | 10,338       | 1,847        |
| 2                  | 1,788           | 20,475                 | 10,073       | 1,936        |
| 3                  | 1,712           | 20,963                 | 9,728        | 2,033        |
| 4                  | 2,551           | 27,329                 | 12,404       | 2,086        |
| 5                  | 2,604           | 30,239                 | 13,298       | 2,62         |
| 6                  | 2,275           | 26,975                 | 11,111       | 1,937        |
| 7                  | 2,814           | 37,537                 | 13,343       | 1,937        |
| 8                  | 2,683           | 34,483                 | 13,219       | 2,376        |
| 9                  | 2,465           | 30,29                  | 12,674       | 2,225        |
| 10                 | 1,847           | 16,693                 | 8,937        | 1,883        |
| 11                 | 1,942           | 15,161                 | 8,874        | 1,721        |
| 12                 | 2,23            | 24,039                 | 9,558        | 2,255        |
| 13                 | 2,592           | 20,487                 | 10,014       | 1,835        |
| 14                 | 2,697           | 14,337                 | 9,245        | 2,069        |
| 15                 | 2,445           | 21,28                  | 9,684        | 2,239        |
| 16                 | 1,77            | 23,826                 | 11,34        | 1,991        |
| 17                 | 1,778           | 22,548                 | 11,029       | 2,046        |
| 18                 | 2,623           | 36,609                 | 12,018       | 1,868        |
| 19                 | 2,714           | 12,526                 | 7,733        | 2,254        |
| 20                 | 2,876           | 20,764                 | 10,107       | 2,718        |
| 21                 | 2,774           | 16,847                 | 9,989        | 2,637        |
| 22                 | 2,33            | 13,404                 | 7,869        | 1,926        |
| 23                 | 2,687           | 22,359                 | 10,003       | 2,291        |
| 24                 | 2,519           | 17,836                 | 7,724        | 1,871        |
| 25                 | 2,663           | 17,296                 | 8,659        | 1,799        |
| 26                 | 2,794           | 34,11                  | 10,911       | 2,228        |
| 27                 | 2,46            | 19,697                 | 9,25         | 2,085        |

A apresentação dos resultados divide-se em quatro etapas: análise da penetração, da zona afetada pelo calor (ZAC), da largura e do reforço.

#### 4.1. PENETRAÇÃO DA SOLDA

Através da análise de variância, apresentada na Tabela 5, pode-se afirmar com um grau de certeza superior a 95% que os parâmetros que apresentaram influência significativa sobre a penetração da solda foram o tipo de gás de proteção (MIG/MAG), a tensão (MIG/MAG), a velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) e a velocidade de soldagem. A ordem de parâmetros que mais afetam a penetração, mensurada a partir dos valores de F, consiste na velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG), tipo de gás de proteção (MIG/MAG), tensão (MIG/MAG) e velocidade de soldagem, respectivamente. A vazão do gás (TIG) e a intensidade da corrente (TIG) não apresentaram influência significativa sobre a penetração nos testes realizados.

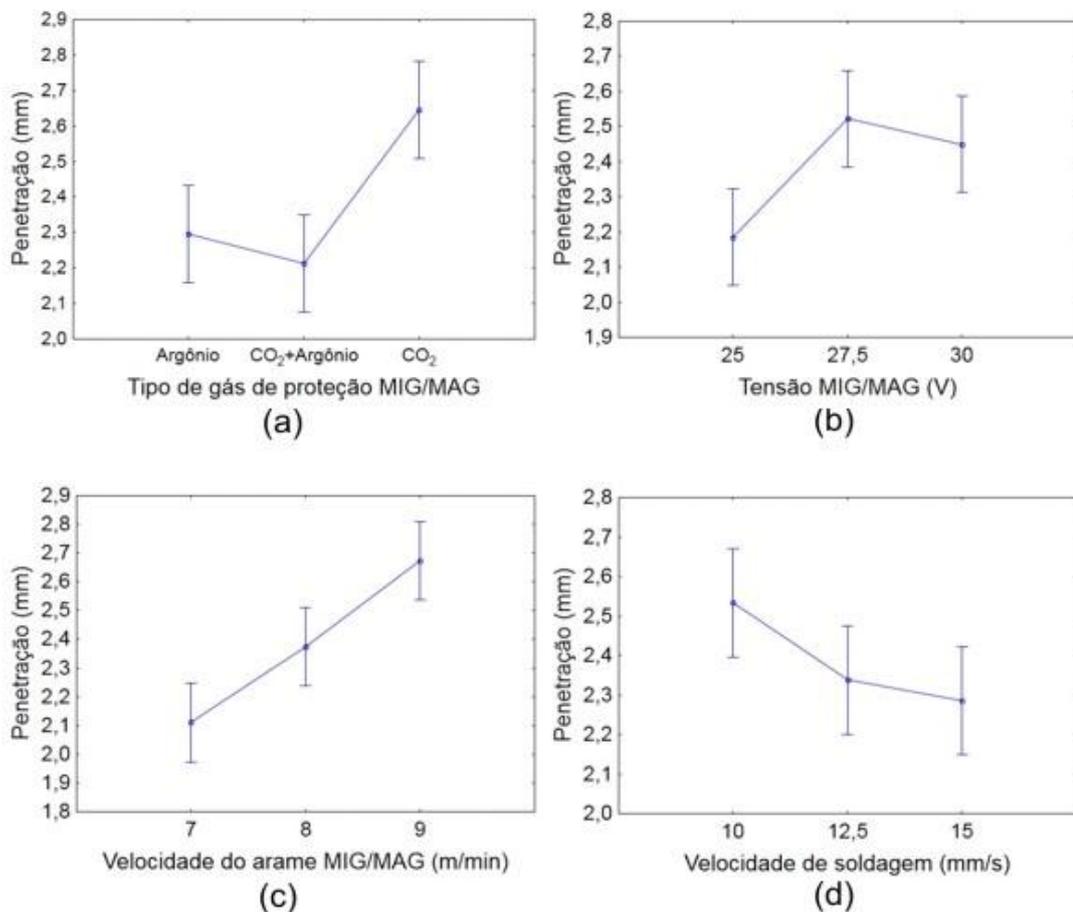
Tabela 5 – Análise de variância para a penetração da solda

| Fonte                         | Soma dos Quadrados | Grau de Liberdade | Médias dos Quadrados | Valor de F | Valor de P |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------|------------|
| Tipo de gás (MIG/MAG)         | 13,9630            | 2                 | 6,9815               | 12,6492    | 0,000728   |
| Tensão (MIG/MAG)              | 9,6757             | 2                 | 4,8379               | 8,7653     | 0,003402   |
| Velocidade do arame (MIG/MAG) | 21,6363            | 2                 | 10,8181              | 19,6005    | 0,000087   |
| Vazão do gás (TIG)            | 0,9285             | 2                 | 0,4643               | 0,8411     | 0,451889   |
| Intensidade da corrente (TIG) | 0,4800             | 2                 | 0,2400               | 0,4348     | 0,655823   |
| Velocidade de soldagem        | 4,3789             | 2                 | 2,1894               | 3,9669     | 0,043163   |
| Residual                      | 7,7270             | 14                | 0,5519               |            |            |

Para uma melhor visualização dos efeitos que os parâmetros de soldagem exercem sobre a penetração, foram plotados na Figura 10, gráficos individuais que possibilitam a realização de uma análise da tendência da penetração em relação aos níveis de cada parâmetro que apresentou influências significativas sobre esta resposta, esta tendência é obtida através da relação entre as médias de valores encontradas para a penetração e os seus respectivos parâmetros utilizados. A Figura 10(a) apresenta o gráfico da penetração em função do tipo de gás de proteção (MIG/MAG), onde se observa que a tendência é de que os maiores valores de penetração sejam obtidos utilizando-se o CO<sub>2</sub> como gás de proteção, já as menores penetrações são resultado da mistura de CO<sub>2</sub> com Argônio. Na Figura 10(b) é ilustrada graficamente a relação entre a tensão (MIG/MAG) e a penetração, para este fator destaca-se que, em média, as menores penetrações foram obtidas

com a menor tensão, já as maiores penetrações foram resultantes do nível intermediário de tensão. A penetração aumentou significativamente com o aumento da velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG), como pode ser verificado na Figura 10(c), sendo que os maiores valores de penetração foram obtidos com o maior nível de velocidade de alimentação do arame. Através da análise da Figura 10(d) verifica-se que um aumento da velocidade de soldagem implica na redução da penetração, o que indica que as maiores penetrações tendem a ser obtidas utilizando-se o menor nível de velocidade de soldagem.

Figura 10 – Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a penetração

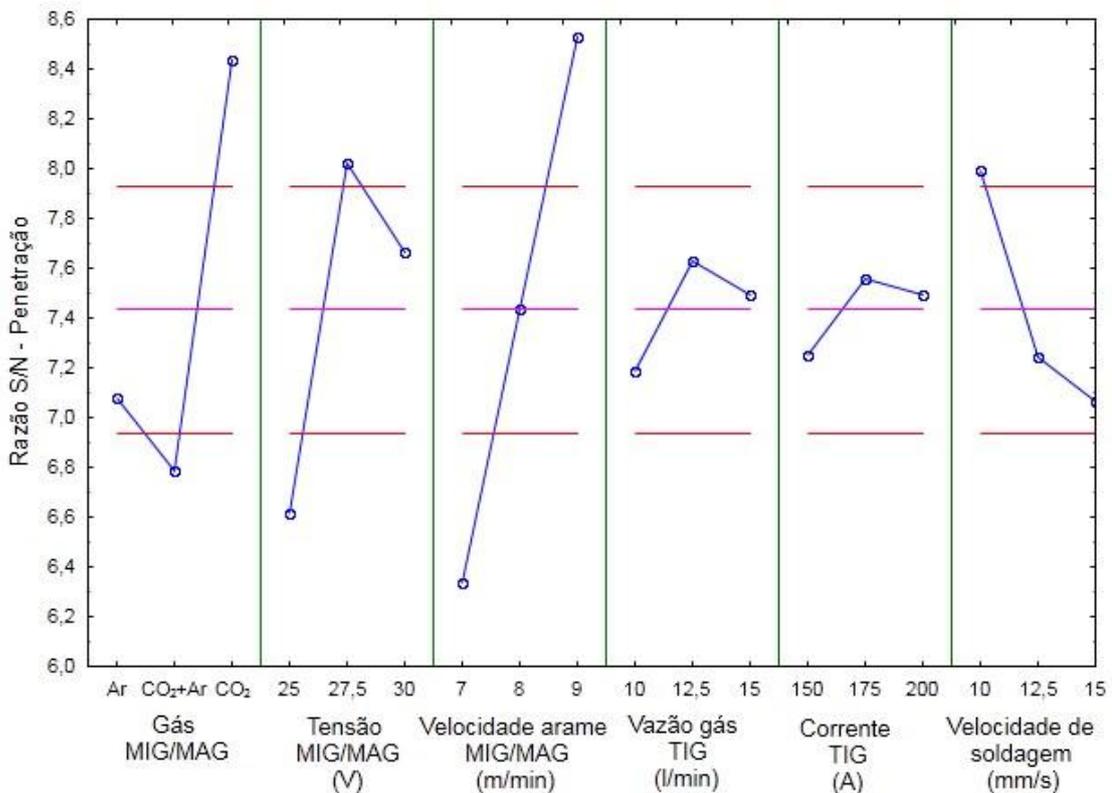


O comportamento da penetração em relação ao tipo de gás de proteção (MIG/MAG) ficou condizente com o apresentado pela literatura, sendo que a utilização do CO<sub>2</sub> tende a apresentar uma maior penetração em relação aos demais gases. A velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) e a velocidade de soldagem seguiram a tendência de que o aumento da primeira ou a diminuição da segunda aumenta a penetração. A tensão (MIG/MAG) tende a apresentar mais

influências sobre outros fatores, como a largura, porém, esta influência da tensão sobre a penetração pode ser uma característica própria deste processo de soldagem híbrida. O fato de a intensidade da corrente (TIG), não ter apresentado efeitos significativos sobre a penetração, não significa que a sua utilização não influencia esta resposta, mas sim, que a alteração de níveis de valores deste parâmetro não provocou mudanças significativas na tendência de variação da penetração, isto pode ser considerado uma característica deste processo de soldagem híbrida, por estarem envolvidos diversos parâmetros de dois tipos de soldagem interagindo simultaneamente.

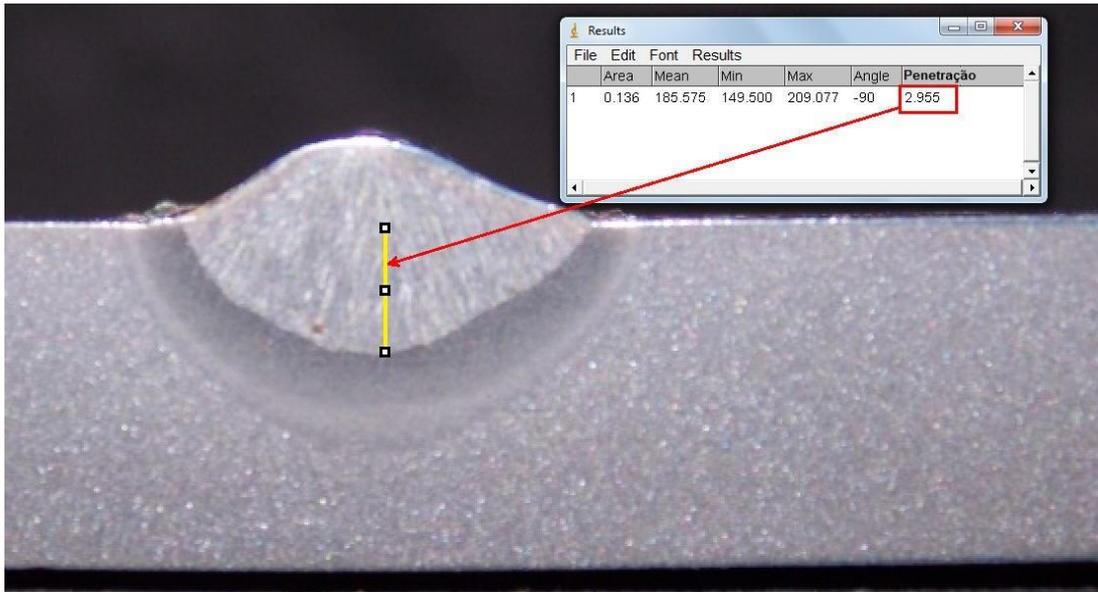
A otimização do processo consistiu na maximização da penetração da solda. Foi plotado o gráfico da razão sinal-ruído (razão S/N) maior é melhor, conforme Figura 11, onde os níveis ideais de parâmetros são aqueles que apresentam a maior razão S/N. Observa-se que a otimização da penetração da solda consiste na utilização do CO<sub>2</sub> como gás de proteção (MIG/MAG), uma tensão (MIG/MAG) igual a 27,5 V, um valor de 9 m/min para a velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG), vazão do gás de proteção (TIG) e intensidade da corrente (TIG) com 12,5 l/min e 175 A, respectivamente, e velocidade de soldagem de 10 mm/s.

Figura 11 – Razão S/N da penetração da solda para os valores analisados



Para confirmar a otimização, foi efetuada a soldagem de um corpo de prova com os parâmetros indicados. A análise confirmou a otimização efetivada, sendo que se obteve uma penetração de 2,955 mm, a maior se comparada às vinte e sete amostras soldadas. O corpo de prova de confirmação é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Corpo de prova otimizado em relação à penetração da solda



#### 4.2. ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC)

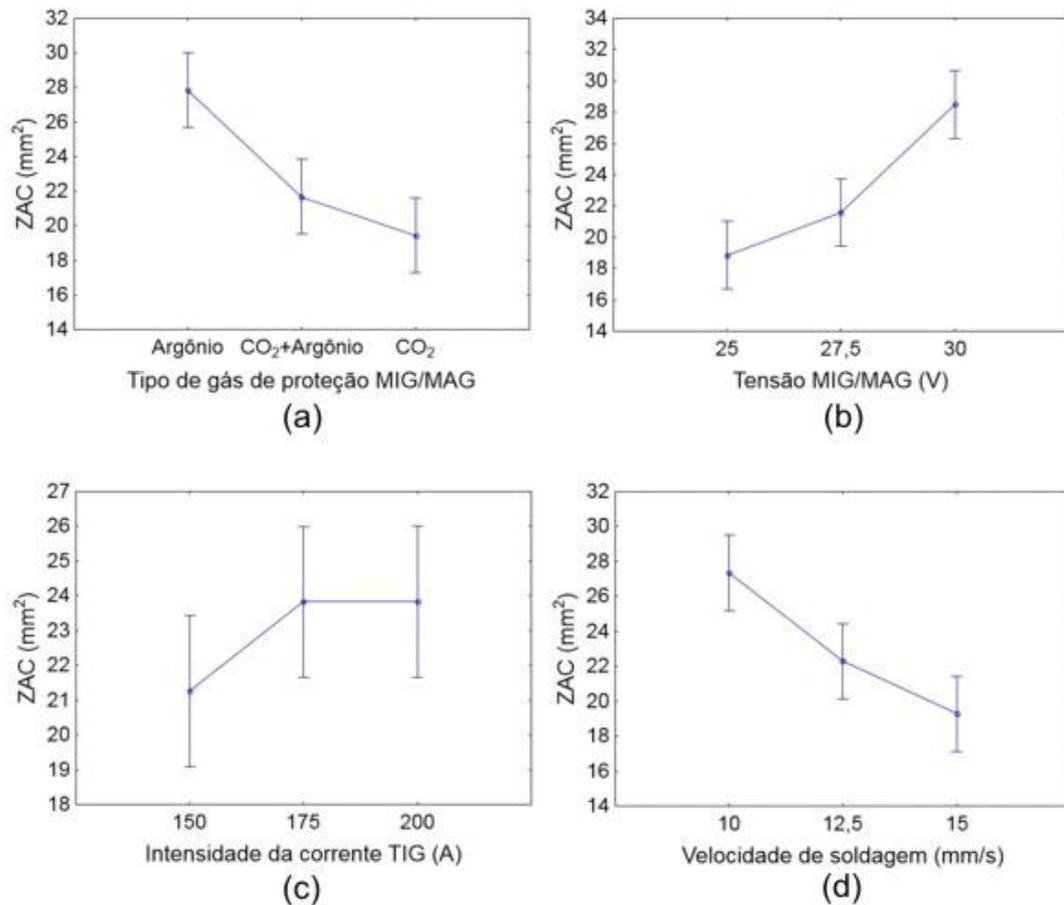
A análise de variância demonstra, através dos valores de P (que foram inferiores a 0,05) e através dos valores de F, que os parâmetros de soldagem que mais apresentaram influência sobre a zona afetada pelo calor (ZAC) foram a tensão (MIG/MAG), o tipo de gás de proteção (MIG/MAG), a velocidade de soldagem e a intensidade da corrente (TIG), respectivamente. A vazão do gás (TIG) e a velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) não apresentaram influência significativa sobre a ZAC, uma vez que obtiveram valores de P superiores a 0,05. A análise de variância é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise de variância para a zona afetada pelo calor (ZAC)

| Fonte                         | Soma dos Quadrados | Grau de Liberdade | Médias dos Quadrados | Valor de F | Valor de P |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------|------------|
| Tipo de gás (MIG/MAG)         | 51,8949            | 2                 | 25,9474              | 25,9006    | 0,000020   |
| Tensão (MIG/MAG)              | 55,9139            | 2                 | 27,9569              | 27,9064    | 0,000013   |
| Velocidade do arame (MIG/MAG) | 0,9890             | 2                 | 0,4945               | 0,4936     | 0,620662   |
| Vazão do gás (TIG)            | 4,3948             | 2                 | 2,1974               | 2,1934     | 0,148370   |
| Intensidade da corrente (TIG) | 7,9646             | 2                 | 3,9823               | 3,9751     | 0,042936   |
| Velocidade de soldagem        | 46,6114            | 2                 | 23,3057              | 23,2636    | 0,000035   |
| Residual                      | 14,0253            | 14                | 1,0018               |            |            |

O comportamento da ZAC em função dos parâmetros que a influenciaram significativamente foi plotado em gráficos, apresentados na Figura 13. Pode-se verificar na Figura 13(a) a tendência da ZAC em função do tipo de gás de proteção (MIG/MAG), onde se observa que os menores valores de ZAC tendem a ser obtidos utilizando o CO<sub>2</sub> como gás de proteção enquanto que a maior ZAC é resultante ao utilizar-se o argônio. Quanto à influência da tensão (MIG/MAG) sobre a ZAC, apresentada na Figura 13(b), verificou-se que quanto maior a tensão utilizada, maior tende ser a ZAC resultante do processo. A Figura 13(c) exibe o gráfico da ZAC em função da intensidade da corrente (TIG), onde ficou visível que os menores valores de ZAC devem ser atingidos com o nível mínimo de corrente, as maiores médias de ZAC foram obtidas com o nível máximo de corrente. Na Figura 13(d) é apresentado o gráfico da influência da velocidade de soldagem sobre a ZAC, quanto a esta relação, afirma-se que o aumento da velocidade de soldagem ocasiona uma redução da ZAC.

Figura 13 – Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a zona afetada pelo calor (ZAC)

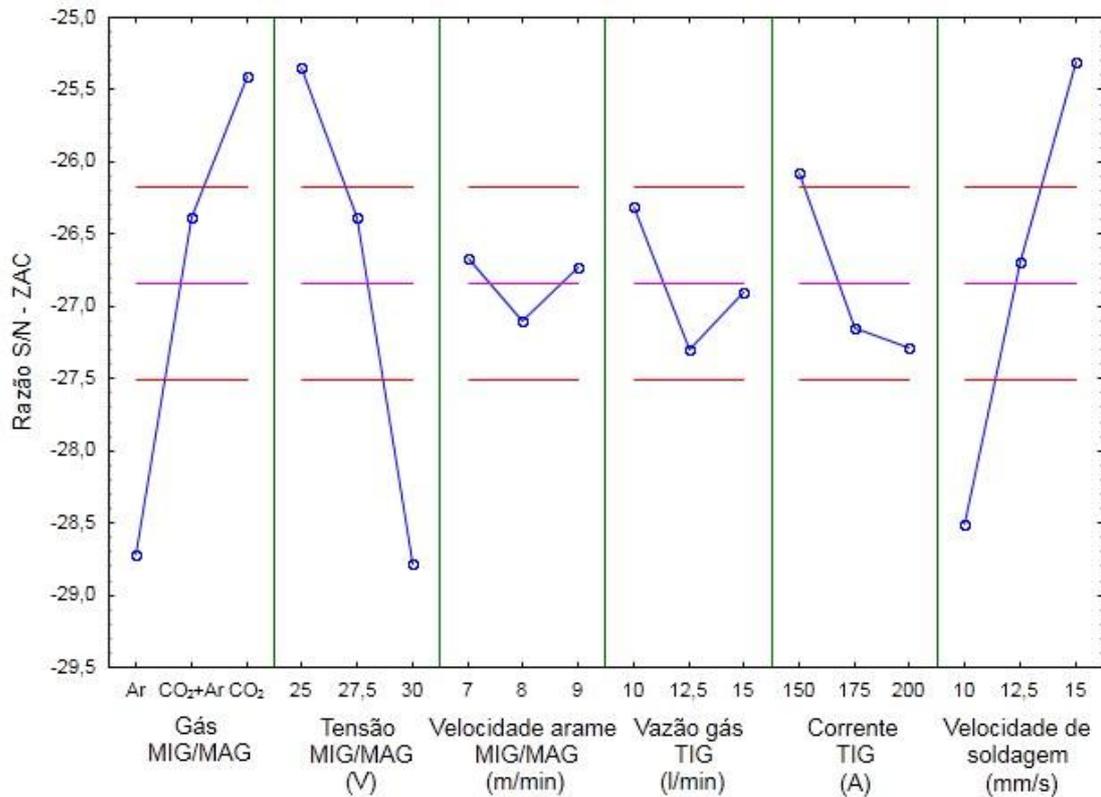


As variações apresentadas seguem a tendência para a zona afetada pelo calor, sendo que gases inertes, como o argônio, proporcionam ao processo maiores taxas de calor, aumentando a ZAC. Da mesma forma, o aumento da tensão, aumento da corrente e diminuição da velocidade de soldagem tendem a ocasionar um aumento da ZAC.

Para a otimização da ZAC, selecionou-se a opção menor é melhor, demonstrando que se deseja obter a menor ZAC possível com os parâmetros testados. Na Figura 14 é apresentado o gráfico da razão S/N para a ZAC, os valores de parâmetros que apresentaram a maior razão S/N são os indicados para a otimização do processo. A menor ZAC deve ser obtida utilizando-se o CO<sub>2</sub> como gás de proteção (MIG/MAG), uma tensão (MIG/MAG) de 25 V e velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) igual a 7 m/min, quanto à vazão do gás de proteção (TIG), deve-se utilizar um valor de 10 l/min, para a intensidade da corrente

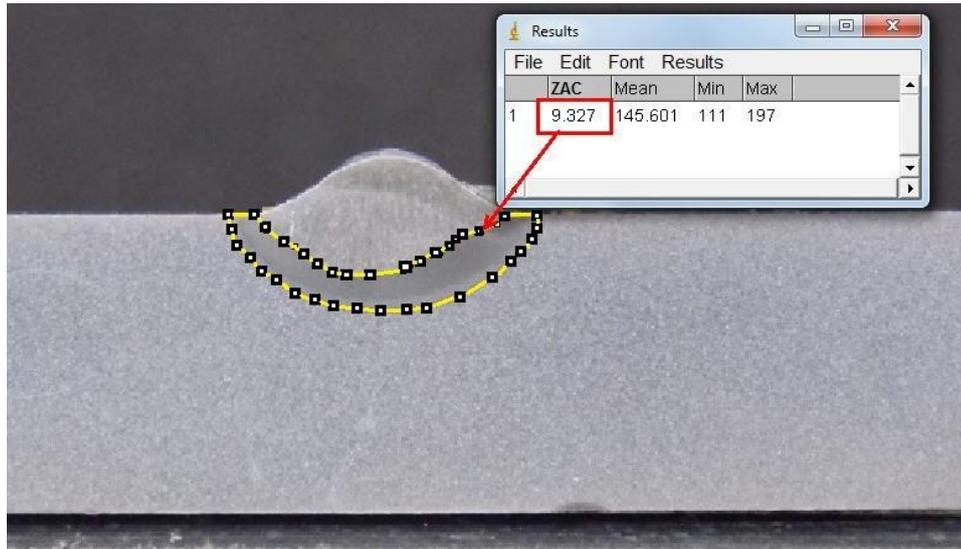
(TIG) o valor indicado foi de 150 A, finalmente, a velocidade de soldagem do processo foi de 15 mm/s.

Figura 14 – Razão S/N da ZAC para os valores analisados



Foi soldado um corpo de prova de comprovação com os valores definidos pela razão S/N para a obtenção da menor ZAC. O valor encontrado foi uma área de 9,327 mm<sup>2</sup> de ZAC, conforme Figura 15, o que confirma a veracidade da otimização, sendo que este valor foi menor do que todos os valores encontrados na medição dos vinte e sete corpos de prova.

Figura 15 – Corpo de prova otimizado em relação à zona afetada pelo calor (ZAC)



#### 4.3. LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA

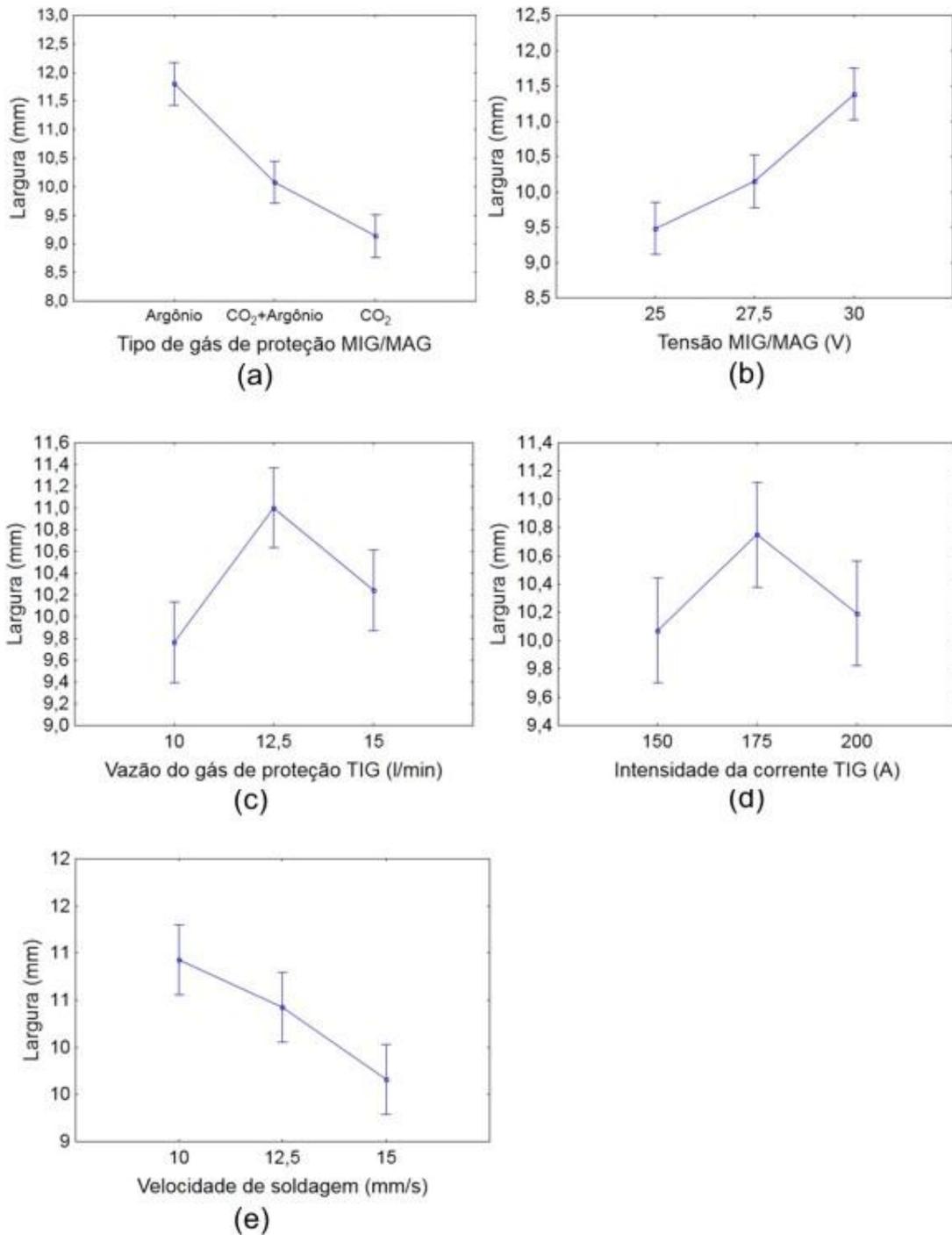
Os parâmetros que mais apresentaram influências sobre a largura foram o tipo de gás de proteção (MIG/MAG), a tensão (MIG/MAG), a velocidade de soldagem, a vazão do gás de proteção (TIG) e a intensidade da corrente (TIG), respectivamente. Isso pode ser interpretado na análise de variância, apresentada na Tabela 7, que aponta para esses parâmetros um valor de P inferior a 0,05 e um valor de F que indica a ordem da influência dos parâmetros sobre a largura. A velocidade de alimentação do arame obteve um valor de P superior a 0,05 na análise de variância, portanto, não se pode afirmar com confiabilidade os efeitos desse parâmetro sobre a largura. A Tabela 7 detalha a análise de variância dos parâmetros de soldagem em relação à largura da solda.

Tabela 7 – Análise de variância para a largura da solda

| Fonte                         | Soma dos Quadrados | Grau de Liberdade | Médias dos Quadrados | Valor de F | Valor de P |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------|------------|
| Tipo de gás (MIG/MAG)         | 22,5827            | 2                 | 11,2914              | 47,9784    | 0,000001   |
| Tensão (MIG/MAG)              | 11,0310            | 2                 | 5,5155               | 23,4361    | 0,000034   |
| Velocidade do arame (MIG/MAG) | 1,1550             | 2                 | 0,5775               | 2,4538     | 0,122023   |
| Vazão do gás (TIG)            | 4,4802             | 2                 | 2,2401               | 9,5185     | 0,002454   |
| Intensidade da corrente (TIG) | 1,9534             | 2                 | 0,9767               | 4,1501     | 0,038437   |
| Velocidade de soldagem        | 5,7615             | 2                 | 2,8807               | 12,2406    | 0,000844   |
| Residual                      | 3,2948             | 14                | 0,2353               |            |            |

Na Figura 16 são apresentados os gráficos individuais de tendência da largura da solda em relação aos parâmetros que apresentaram influência significativa sobre a mesma. A Figura 16(a) apresenta o gráfico da largura em função do tipo de gás de proteção (MIG/MAG), onde se detectou a obtenção das maiores médias de largura com a utilização do argônio e as menores larguras com o CO<sub>2</sub>. A largura possui uma tendência definida em relação à tensão (MIG/MAG), expressada na Figura 16(b), que indica um aumento de largura com o aumento da tensão. A Figura 16(c) apresenta o gráfico da largura em função da vazão do gás de proteção (TIG), as maiores larguras foram alcançadas com o nível intermediário de vazão, enquanto que as menores médias de largura foram obtidas com a vazão estando em seu nível mínimo. O gráfico da largura em função da intensidade da corrente (TIG), plotado na Figura 16(d), apresenta que o nível intermediário de corrente tende a ocasionar a obtenção das maiores larguras. Na Figura 16(e) é apresentado o gráfico da largura em função da velocidade de soldagem, o gráfico aponta que o aumento da velocidade resultou em diminuição da largura.

Figura 16 – Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a largura



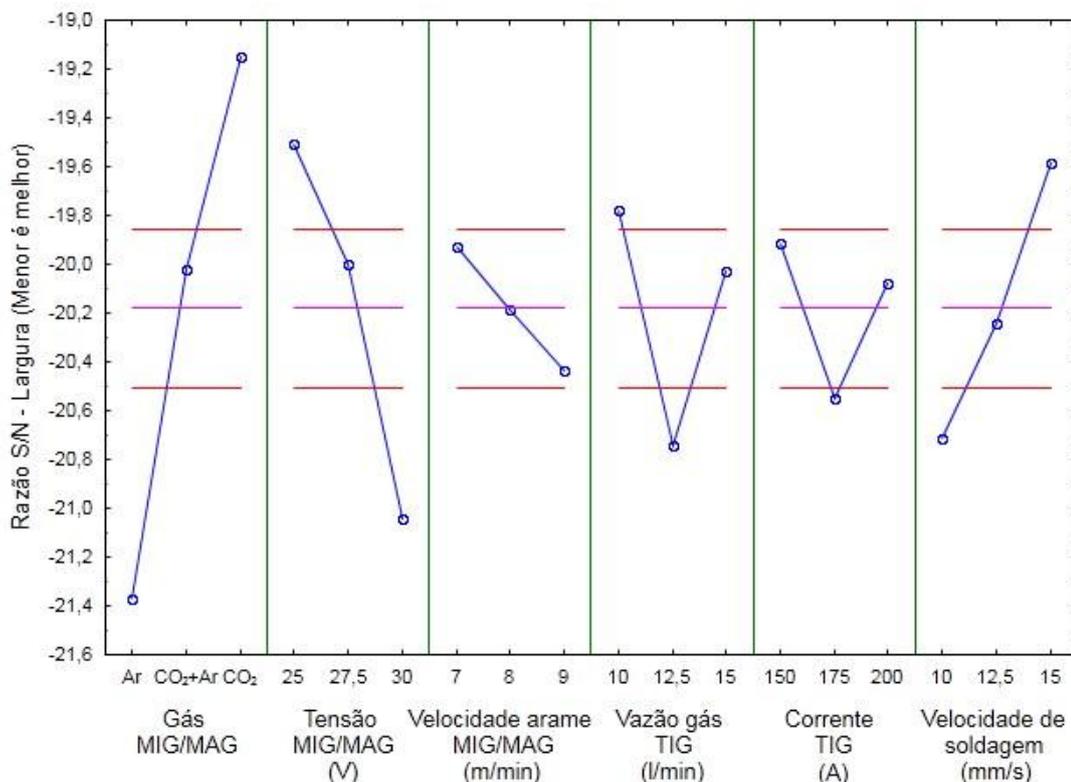
As influências apresentadas pela tensão (MIG/MAG) e pela velocidade de soldagem sobre a largura seguem o especificado na literatura, a qual aponta que o aumento da largura é ocasionado pelo aumento da tensão ou redução da velocidade. O conceito do processo convencional de soldagem TIG para a corrente de soldagem não se aplicou a esse processo, sendo que a maior corrente (TIG) não ocasionou as maiores larguras, porém, esse não é um processo convencional e esse

parâmetro pode ter sido influenciado por outros parâmetros do processo de soldagem híbrida. No processo de soldagem TIG-MAG em tandem desenvolvido por Teixeira (2011), os parâmetros TIG sequer apresentaram influências significativas sobre a largura, os únicos parâmetros significativos para esta resposta foram tensão (MAG) e a velocidade de soldagem.

A otimização da largura foi efetuada para dois casos, ou seja, realizou-se uma otimização de parâmetros para uma razão S/N maior é melhor e outra otimização para a razão S/N menor é melhor.

Na Figura 17 é apresentada a razão S/N menor é melhor da largura da solda. Este gráfico aponta a obtenção da menor largura através da configuração de um processo de soldagem com o CO<sub>2</sub> como gás de proteção (MIG/MAG), tensão (MIG/MAG) e velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) iguais a 25 V e 7 m/min, respectivamente, os parâmetros de soldagem TIG consistem em uma vazão do gás de proteção igual a 10 l/min e intensidade da corrente de 150 A, a velocidade de soldagem definida pela razão S/N foi de 15 mm/s.

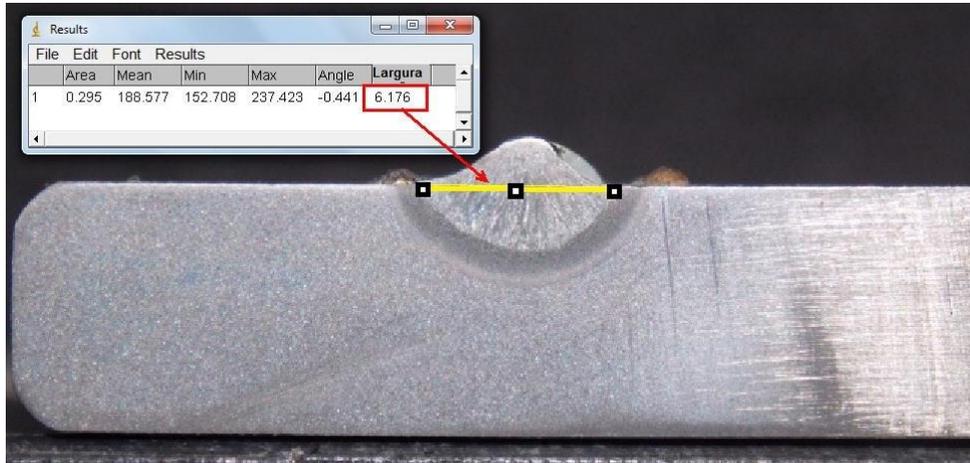
Figura 17 – Razão S/N menor é melhor da largura para os valores analisados



Um novo corpo de prova foi soldado com os parâmetros indicados pela razão S/N, a largura resultante foi de 6,176 mm, a menor obtida em comparação com os

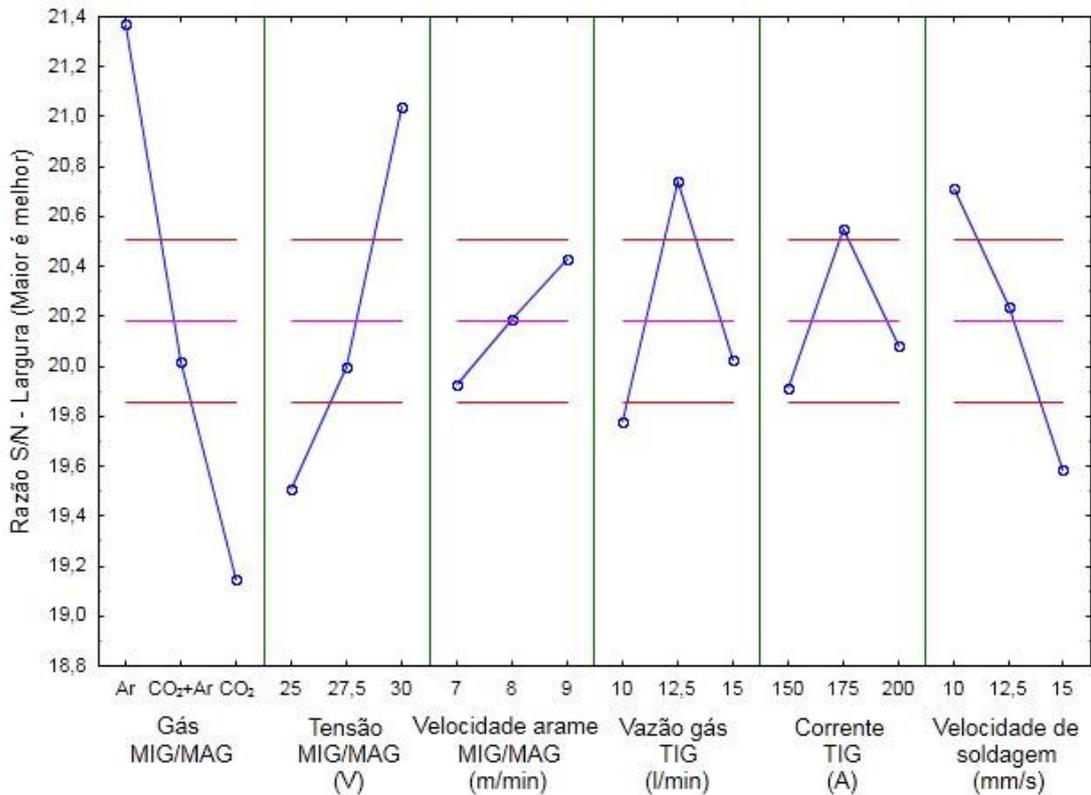
vinte e sete corpos de prova soldados, confirmando a otimização do processo em relação a esta variável. O corpo de prova otimizado é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Corpo de prova otimizado para a obtenção da menor largura de solda



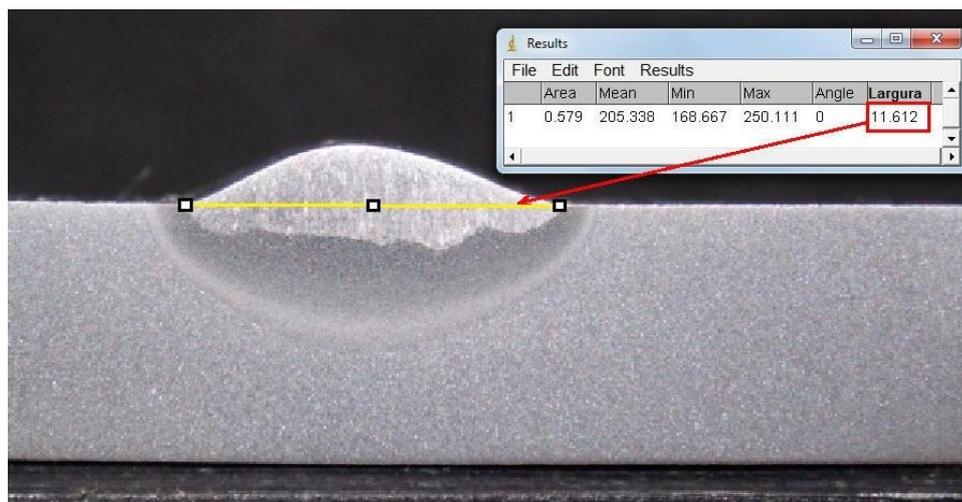
O gráfico da razão S/N para a maior largura é ilustrado na Figura 19. De acordo com o gráfico, define-se que a maior largura de solda é obtida com o gás de proteção (MIG/MAG) argônio, uma tensão (MIG/MAG) de 30 V, velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) igual a 9 m/min, vazão do gás (TIG) e intensidade da corrente (TIG) de 12,5 l/min e 175 A, respectivamente, e uma velocidade de soldagem de 10 mm/s.

Figura 19 – Razão S/N maior é melhor da largura para os valores analisados



Uma nova amostra foi soldada com os parâmetros indicados, a largura obtida com estes parâmetros foi de 11,612 mm, conforme Figura 20.

Figura 20 – Corpo de prova otimizado para a obtenção da maior largura de solda



O corpo de prova soldado para esta otimização não obteve a maior largura se comparada às vinte e sete amostras, porém, as amostras que alcançaram larguras

superiores à amostra otimizada, obtiveram elevados níveis de mordedura (o que foi considerado como largura, conseqüentemente, aumentando as medidas). Sendo assim, analisando as soldas sem este defeito, pode-se afirmar que a otimização foi efetivada para esta variável.

#### 4.4. REFORÇO DA SOLDA

Nas análises realizadas para o reforço de solda, realizou-se uma otimização buscando a sua minimização, porém, com a condição de que o mesmo existisse na solda, ou seja, tivesse um valor maior que zero.

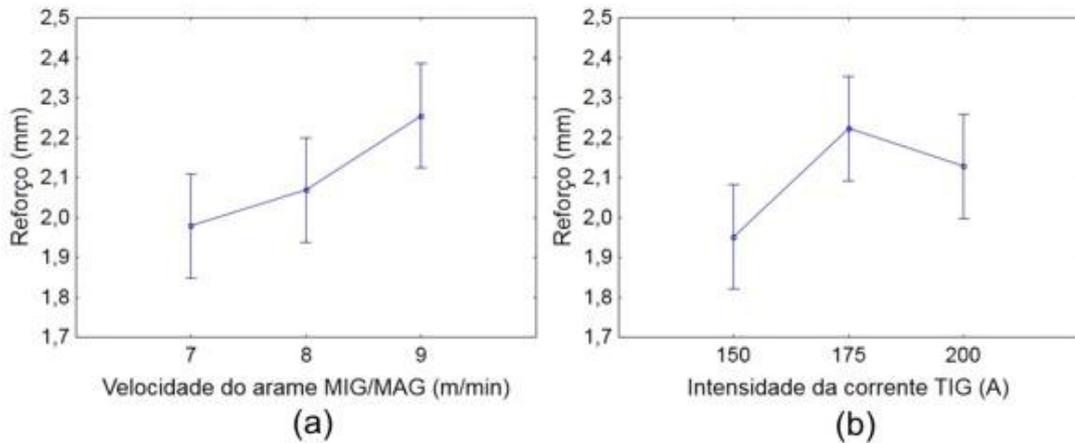
Os parâmetros de soldagem que apresentaram, na análise de variância, valores de P inferiores a 0,05 foram a velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) e a intensidade da corrente (TIG), sendo assim, afirma-se com uma confiabilidade superior a 95% que estes parâmetros apresentaram influências sobre o reforço. Quanto aos demais parâmetros, nada pode-se afirmar. A análise de variância para o reforço da solda pode ser visualizada na Tabela 8.

Tabela 8 – Análise de variância para o reforço da solda

| Fonte                         | Soma dos Quadrados | Grau de Liberdade | Médias dos Quadrados | Valor de F | Valor de P |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------|------------|
| Tipo de gás (MIG/MAG)         | 3,1219             | 2                 | 1,5609               | 2,7110     | 0,101119   |
| Tensão (MIG/MAG)              | 0,3196             | 2                 | 0,1598               | 0,2776     | 0,761706   |
| Velocidade do arame (MIG/MAG) | 5,5596             | 2                 | 2,7798               | 4,8279     | 0,025429   |
| Vazão do gás (TIG)            | 4,0278             | 2                 | 2,0139               | 3,4977     | 0,058617   |
| Intensidade da corrente (TIG) | 5,3896             | 2                 | 2,6948               | 4,6802     | 0,027767   |
| Velocidade de soldagem        | 2,1201             | 2                 | 1,0600               | 1,8410     | 0,195059   |
| Residual                      | 8,0609             | 14                | 0,5758               |            |            |

A tendência de comportamento do reforço em relação aos parâmetros que o influenciaram significativamente pode ser observada na Figura 21. O parâmetro que mais apresentou influência sobre o reforço foi a velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG), a tendência apresentada na Figura 21(a) indica que o reforço aumentou quando foi elevada a velocidade do arame, e diminuiu com o decréscimo da mesma. A Figura 21(b) apresenta o gráfico do reforço em função da intensidade da corrente (TIG), a tendência foi de que os maiores reforços sejam alcançados com o nível intermediário e os menores reforços com o nível mínimo de corrente.

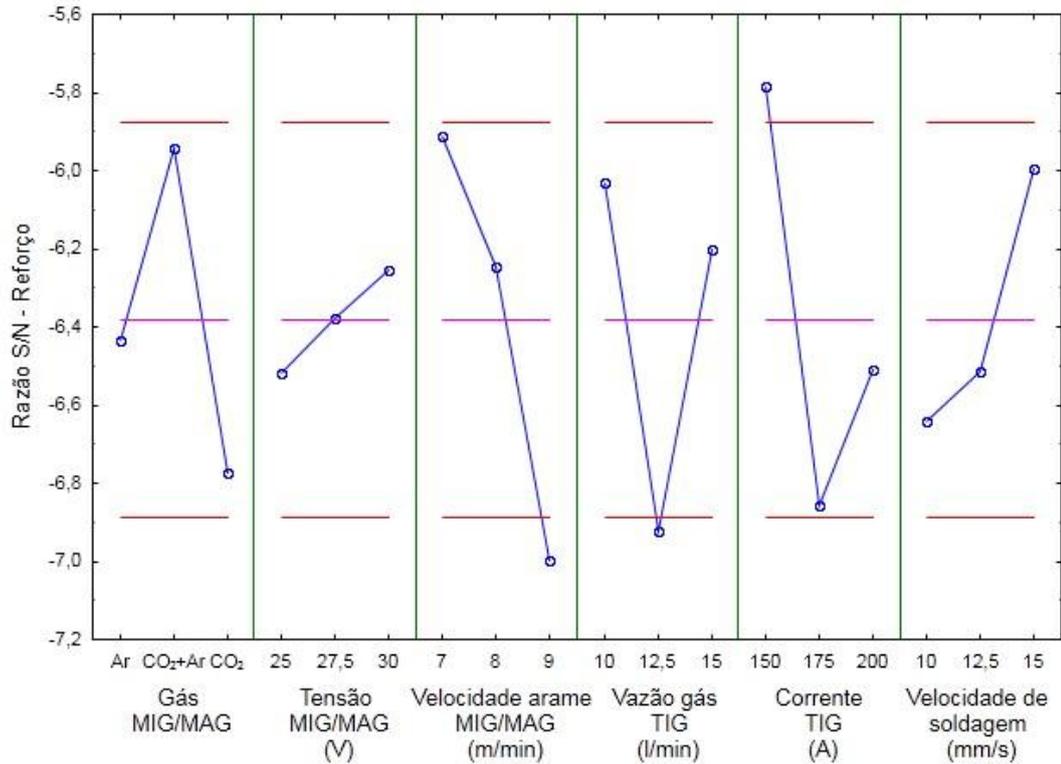
Figura 21 – Efeito dos parâmetros de soldagem sobre o reforço



O reforço consiste na altura de material depositado acima da superfície da solda, desta forma, a tendência é de que o aumento da velocidade do arame (deposição de material) provoque um aumento do reforço, este resultado foi obtido neste estudo, sendo que a proporcionalidade entre ambas é visível no gráfico da Figura 21(a).

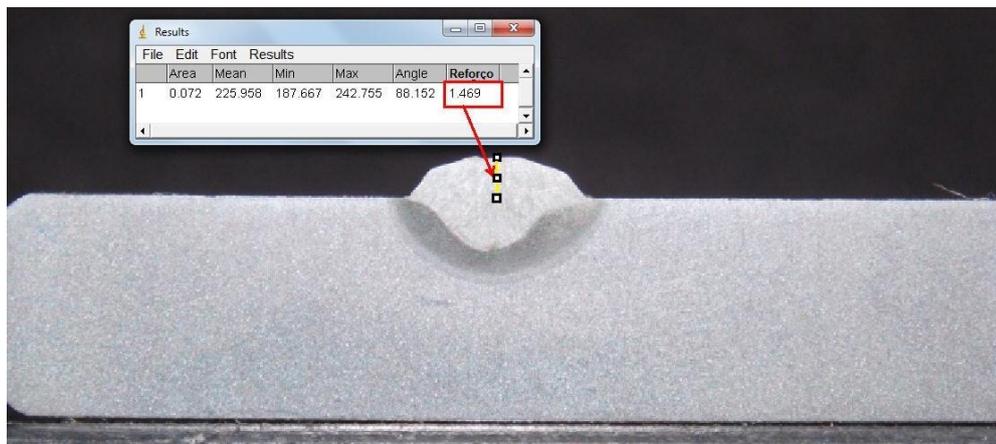
O gráfico da razão S/N, apresentado na Figura 22, exhibe os parâmetros indicados para a otimização do reforço em relação à condição menor é melhor, ou seja, apresenta os parâmetros utilizados para a obtenção do menor reforço. Os valores indicados consistem em um gás de proteção (MIG/MAG) composto pela mistura de  $\text{CO}_2$  e argônio, 30 V de tensão (MIG/MAG), velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) de 7 m/min, vazão do gás de proteção (TIG) igual a 10 l/min, intensidade da corrente (TIG) de 150 A e uma velocidade de soldagem igual a 15 mm/s.

Figura 22 – Razão S/N do reforço para os valores analisados



Efetuiu-se a soldagem do corpo de prova de confirmação com os valores indicados pela razão S/N, o mesmo apresentou um reforço de 1,469 mm. A amostra de confirmação é apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Corpo de prova otimizado em relação ao reforço da solda



O corpo de prova otimizado alcançou o menor reforço, comparado às vinte e sete amostras soldadas na fase experimental, isto comprova a otimização realizada para esta variável.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental sobre uma tecnologia de soldagem híbrida composta pelas soldagens TIG e MIG/MAG, de forma automatizada sobre peças de Aço SAE 1045.

Foi realizada a otimização do processo de soldagem híbrida em relação à geometria do cordão de solda (penetração, ZAC, largura e reforço). Através da razão S/N, o processo foi otimizado para cada uma das variáveis de saída estudadas e a otimização foi confirmada através da soldagem de novos corpos de prova.

Através da realização de experimentos e da utilização do método Taguchi, detectou-se as influências dos parâmetros de soldagem sobre as quatro variáveis de saída. Os parâmetros que apresentaram influências sobre a penetração foram o tipo de gás de proteção (MIG/MAG), a tensão (MIG/MAG), a velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) e a velocidade de soldagem. A ZAC foi influenciada significativamente pelo tipo de gás de proteção (MIG/MAG), tensão (MIG/MAG), intensidade da corrente (TIG) e velocidade de soldagem. Os parâmetros que apresentaram efeitos sobre a largura foram o tipo de gás de proteção (MIG/MAG), a tensão (MIG/MAG), a vazão do gás de proteção (TIG), a intensidade da corrente (TIG) e a velocidade de soldagem. O reforço foi influenciado significativamente pela velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) e pela intensidade da corrente (TIG).

A utilização do método Taguchi provou ser de grande importância para pesquisas experimentais, por possibilitar, através da análise de variância, a identificação dos parâmetros de entrada que influenciam cada variável de saída, e por realizar, através da razão S/N, a otimização de cada resposta com a indicação dos melhores níveis de parâmetros de entrada a serem utilizados no processo.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Apresenta-se a seguir as sugestões para trabalhos futuros:

- Verificar as vantagens do processo híbrido em cada resposta, realizando os testes com os processos TIG e MIG/MAG de forma individual e comparando aos resultados obtidos com a soldagem híbrida;
- Realizar estudos com a soldagem híbrida TIG-MIG/MAG aplicada a diferentes tipos de materiais e com a variação de diferentes parâmetros como o ângulo e a distância das tochas em relação à peça de trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, L. H. D. **Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de vazios relacionados à solidificação em processos de fundição de Aço ABNT 1030.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica / Área de Concentração em Gestão e Otimização) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
- 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.
- ANAWA, E. M.; OLABI, A. G. Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components. **Optics & Laser Technology**, v. 40, p. 379–388, 2008.
- AWS D1.1. **Structural Welding Code – Steel.** 18. ed. Miami: American Welding Society, 2002.
- AWS. **Welding Handbook - Welding Process.** v. 2, 8. ed. Miami: American Welding Society, 1991.
- AWS. **Welding Handbook - Welding Technology.** v. 1, 8. ed. Miami: American Welding Society, 1991.
- CAMPANA, G.; FORTUNATO, A.; ASCARI, A.; TANI, G.; TOMESANI, L. The influence of arc transfer mode in hybrid laser-mig welding. **Journal of Materials Processing Technology**, 2007, p. 111-113.
- COLOMBARI, R. R. **Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Engenharia de Produção) – Departamento de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.
- DELGADO, L. C. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- DESHMUKH, P.; SORTE, M. B. Optimization of Welding Parameters Using Taguchi Method for Submerged Arc Welding On Spiral Pipes. **International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)**, Dehli, India, v. 2, n. 5, Nov. 2013.
- DYKHNO, I.; DAVIS, R. **Joining GMAW and GTAW: Hybrid welding takes on a whole new meaning with new technology developments.** The Fabricator – Fabricators & Manufacturers Association, 2006.
- HARRIS, I. D. **High-Speed GMAW and Laser GMAW Hybrid Welding of Steel Sheet.** 2009. Tese (PhD) – School of Applied Sciences, Cranfield University, 2009.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos.** Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia.** 11. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MESSLER, R. W. J. What's Next for Hybrid Welding?. **Welding Journal**, v. 83, n. 3, Mar 2004.

MODENESI, P. J. A química da formação do cordão na soldagem TIG. **Revista Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 18, nº. 3, p. 287-300, Jul/Set 2013.

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

NIELSEN, S. E. **Hybrid welding of thick section mild steel**. FORCE Institute, Brøndby, Denmark. 2011.

OLIVEIRA, M. A. de. **Desenvolvimentos no processo híbrido PLASMA-MIG para operações de soldagem e brasagem**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia / Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

RAYES, M. E.; WALZ, C.; SEPOLD, G. The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry. **Welding Journal**. v. 83, n. 5, Maio 2004.

REUTZEL, E. W.; SULLIVAN, M. J.; MIKESIC, D. A. Joining Pipe with the Hybrid Laser-GMAW Process: Weld Test Results and Cost Analysis, **Welding Journal**, jun. 2006, p. 66-71.

SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C.; OKUYAMA, M. P.; SILVA, R. H. G. Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos. **Revista Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 333-340, Out./Dez. 2011.

TEIXEIRA, G. S. **Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG-MAG em Tandem**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VASCONCELOS, E. C. **Uma aplicação da metodologia Projeto e Análise de Experimentos na construção de matrizes QFD**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Engenharia de Produção) – Departamento de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.

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