UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

AVALIAÇÃO DE ASPECTOS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG

Sarah Cristina Azevedo

Catalão – GO

2019

sistema de bibliotecas ufg

PRPG
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO

UFG

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: [x] Dissertação [ ] Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Sarah Cristina Azevedo

Título do trabalho: AVALIAÇÃO DE ASPECTOS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [ ] NÃO[1]

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Sarah Cristina Azevedo

Assinatura do(a) autor(a)[2]

Ciente e de acordo:

Prof. André Alves de Resende
Curso de Engenharia de Produção CAC/UFG

Assinatura do(a) orientador(a)[2]

Data: 12/04/2019

AVALIAÇÃO DE ASPECTOS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG

Sarah Cristina Azevedo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.**

Área de Concentração: Engenharia de Operações e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. André Alves de Resende

Catalão – GO

Brasil

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Cristina Azevedo, Sarah
AVALIAÇÃO DE ASPECTOS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG [manuscrito] / Sarah Cristina Azevedo. - 2019.
CIX, 109 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. André Alves de Resende.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia e Administração, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Catalão, 2019.
Bibliografia. Anexos. Apêndice.
Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Soldagem Híbrida. 2. Geometria do Cordão de Solda. 3. TIG MIG/MAG. I. Alves de Resende, André , orient. II. Título.

CDU 658.5

FENG
UAE de Engenharia

Serviço Público Federal
Universidade Federal de Goiás – UFG
Regional Catalão – RC
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

UFG

ATA DA SESSÃO DE JULGAMENTO DA DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE

SARAH CRISTINA AZEVEDO

Aos doze dias do mês de março do ano de dois mil e dezenove (12/03/2019), às 09h00mim (nove horas), na Sala do Mestrado em Engenharia de Produção, no Bloco "O" da Regional Catalão/UFG, teve lugar a 4ª Sessão Pública de Julgamento da Dissertação de Mestrado de Sarah Cristina Azevedo, matrícula nº 2017101613, CPF nº 041.757.071-66, intitulada **"AVALIAÇÃO DE ASPECTOS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG"**. A Banca Examinadora foi composta, conforme Portaria nº 13/2019 da FENG – RC/UFG, pelos **Profº. Dr. André Alves de Resende** (Orientador) CPF 989.108.841-34, **Prof. Dr. Carlos Antonio Ribeiro Duarte** (Membro Interno), CPF 095.314.626-07 e pelo **Prof. Dr. Ruham Pablo Reis** (Membro Externo a Instituição), CPF nº 029.515.626-08. Os examinadores arguiram na ordem citada, tendo o mestrando respondido livremente conforme seus entendimentos acerca do assunto. Às ____ horas e ____ minutos a Banca Examinadora passou ao julgamento, em Sessão Secreta, tendo o mestrando obtido os seguintes resultados:

Prof. Dr. André Alves de Resende – Ass. _____
Aprovado (X) Reprovado ( )

Prof. Dr. Carlos Antonio Ribeiro Duarte – Ass. _____
Aprovado (X) Reprovado ( )

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis – Ass. _____
Aprovado (X) Reprovado ( )

Obs.: _____

Presidente da Banca – Prof. Dr. André Alves de Resende – Ass. _____

Resultado final: APROVADO (X) REPROVADO ( )

Reaberta a Sessão Pública, o Presidente da Banca Examinadora proclamou o resultado e encerrou a Sessão, da qual foi lavrada a presente Ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora, pelo Mestrando examinado e pela Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – RC/UFG.

Assinatura do Mestrando _____

Secretaria do PPGEP-RC/UFG _____

Obs: O(a) aluno(a) deverá encaminhar, no prazo de até 30 (trinta) dias, a contar da data da Defesa Pública, os exemplares definitivos da Dissertação, para arquivamento e devidos encaminhamentos, conforme as normas definidas pelo PPGEP-RC/UFG

Dedico este trabalho aos meus pais,
irmão e avós com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Alves de Resende, pela orientação e pelo comprometimento demonstrado nestes anos de trabalho, contribuindo para o meu aperfeiçoamento e possibilitando que este trabalho se tornasse realidade, com certeza eu não seria capaz sem o seu auxílio;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFG – Regional Catalão, pela oportunidade de realização deste curso. Agradecimento em especial ao Laboratório de Fabricação Mecânica, pelo apoio cujo qual, possibilitou a realização deste trabalho;

À colega Gabriela do Laboratório de Fabricação Mecânica, por ter contribuído para a realização desta pesquisa;

Ao técnico de laboratório, Iago, pelo apoio técnico;

À minha família, pais, irmão e avós, por serem capazes de acreditarem e investirem em mim. Pelo cuidado e dedicação de minha mãe, que por muitas vezes me deu esperanças para seguir, me trazendo paz na correria de cada dia. Ao meu pai, pelo incentivo, pela força e principalmente pelo carinho. Pela paciência e palavras de apoio oferecidas por minha avó, certificando-me que não estou sozinha nessa caminhada. Agradecimento em especial ao meu avô, o qual contribuiu com o seu apoio técnico, possibilitando a realização dos testes, além, é claro, de todo carinho depositado por ele, em mim;

Aos meus amigos e amigas, pelo incentivo e pelas horas de descontração;

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte dessa etapa em minha vida, contribuindo para o meu sucesso e crescimento como pessoa; meu muito obrigada.

AZEVEDO, S. C. **Avaliação de Aspectos Operacionais do Processo de Soldagem TIG-MIG/MAG**.109p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO. 2019.

RESUMO

Na busca por ganhos de produtividade e redução de custos, a otimização de processos de soldagem tem se apresentado como uma oportunidade para as indústrias do setor metal-mecânico. Neste contexto, os chamados “Processos híbridos de Soldagem”, na qual são combinados dois ou mais processos convencionais, têm ganhado destaque. Dentre estes, o TIG-MIG/MAG tem-se mostrado uma alternativa, principalmente por associar processos já tradicionalmente conhecidos e utilizados no mercado. Assim, o objetivo geral do presente trabalho é analisar a influência das variáveis do processo TIG-MIG/MAG sobre a geometria do cordão de solda obtido. Para tanto, em um primeiro momento, foram realizadas soldagens de simples deposição sobre chapa, variando a corrente TIG, o ângulo da tocha TIG, o ângulo da tocha MIG/MAG e a distância entre os eletrodos. Em seguida, foram realizados testes variando o circuito de corrente do processo TIG e MIG/MAG. Como principais resultados, para o conjunto de parâmetros avaliados, foi verificado que é possível atuar sobre a geometria do cordão de solda, variando os parâmetros de posicionamento e corrente TIG e MIG/MAG. Uma maior área fundida e penetrada alcançada com o ângulo da tocha TIG e o ângulo da tocha MIG/MAG, nos valores máximos e a distância entre os eletrodos no valor mínimo. Inserir a corrente no circuito TIG, contribui para uma maior área fundida e uma maior penetração. Uma maior largura é obtida ao utilizar o ângulo da tocha TIG e o ângulo da tocha MIG/MAG nos valores mínimos e a distância entre eletrodos, nos valores máximos, nesse sentido, a inserção da corrente no circuito TIG aumenta a largura. O maior reforço é obtido ao utilizar o ângulo da tocha TIG e o ângulo da tocha MIG/MAG nos valores máximos e a distância entre eletrodos no valor mínimo. Já quando é inserida a corrente no circuito TIG, há um decréscimo nos valores do reforço. E, por fim, um maior ângulo de convexidade foi conseguido ao utilizar os ângulos das tochas nos valores máximos, já com a inserção da corrente no circuito TIG, houve um decréscimo nos valores de ângulo de convexidade.

Palavras- chave: Soldagem Híbrida, Geometria do Cordão de Solda, TIG-MIG/MAG.

AZEVEDO, S. C. **Evaluation of Operational Aspects of the TIG-MIG / MAG Welding Process**. 109 p. Masters Dissertation, Federal University of Goiás, Catalão, GO. 2019.

ABSTRACT

In the search for productivity gains and cost reduction, the optimization of welding processes has been presented as an opportunity for the industries of the metal-mechanic sector. In this context, the so-called "Hybrid Welding Processes", in which two or more conventional processes are combined, have gained prominence. Among these, TIG-MIG / MAG has shown itself to be an alternative, mainly because it associates processes already traditionally known and used in the market. Thus, the general objective of the present work is to analyze the influence of the TIG-MIG / MAG process variables on the weld bead geometry obtained. For this purpose, welds of simple deposition on sheet were performed, varying the TIG current, the TIG torch angle, the MIG / MAG torch angle and the distance between the electrodes. Then, tests were performed by varying the current circuit of the TIG and MIG / MAG process. As main results, for the set of evaluated parameters, it was verified that it is possible to act on the weld bead geometry, varying the positioning parameters and the TIG and MIG / MAG current. Greater melt and penetration area achieved with TIG torch angle and MIG / MAG torch angle, maximum values and the distance between the electrodes in the minimum value. Inserting the current into the TIG circuit contributes to a greater melt area and greater penetration. A greater width is obtained by using the TIG torch angle and the MIG / MAG torch angle in the minimum values and the distance between electrodes, in the maximum values, in this sense, the insertion of the current in the TIG circuit increases the width. The greatest reinforcement is obtained by using the TIG torch angle and the MIG / MAG torch angle at the maximum values and the minimum electrode distance. Already when the current is inserted in the TIG circuit, there is a decrease in the values of the reinforcement. Finally, a greater angle of convexity was achieved by using the torch angles at the maximum values, and with the insertion of the current in the TIG circuit, there was a decrease in the convexity angle values.

Keywords: Hybrid Welding, Weld Bead Geometry,TIG-MIG/MAG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema do processo de soldagem TIG.....	20
Figura 2	Vista esquemática de um bocal da tocha, arame eletrodo e arco MIG/MAG mais metal de base e metal depositado.....	25
Figura 3	(A) Comportamento do arco em CC+ e (b) em CC -.....	26
Figura 4	Combinação dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG em um único processo.....	31
Figura 5	Efeito dos fatores de soldagem na penetração.....	32
Figura 6	Amostra de teste otimizada em relação a penetração da solda.....	33
Figura 7	Tocha construída para soldagem híbrida TIG-MIG/MAG.....	35
Figura 8	Visão geral da bancada experimenta.....	37
Figura 9	Fonte multiprocesso utilizada na parte do MIG/MAG do processo (b) Fonte inversora utilizada na parte TIG do processo.....	38
Figura 10	Tochas MIG/MAG e TIG montadas em suporte para soldagem TIG-MIG/MAG.....	39
Figura 11	Unidade de refrigeração de água Fabricante IMC, Modelo: UPR 7500.....	39
Figura 12	Movimentador.....	40
Figura 13	Posição das tochas de soldagem.....	43
Figura 14	Medição da variável distância entre os eletrodos.....	48
Figura 15	Seção no corpo de prova.....	48
Figura 16	Vista dos parâmetros geométricos medidos.....	49
Figura 17	Gráfico efeitos principais para área fundida do metal de base.....	53
Figura 18	Interação para área fundida do metal de base.....	53
Figura 19	Gráfico efeitos principais para penetração.....	55
Figura 20	Interação para penetração.....	56
Figura 21	Gráfico efeitos principais para largura.....	58
Figura 22	Interação para largura.....	59
Figura 23	Gráfico efeitos principais para reforço.....	60
Figura 24	Interação para reforço.....	61
Figura 25	Gráfico efeitos principais para ângulo de convexidade.....	62
Figura 26	Interação para ângulo de Convexidade.....	62
Figura 27	Representação gráfica do planejamento composto central.....	66
Figura 28	Superfície de resposta da área fundida do cordão de solda em relação da Tocha TIG e distância entre os eletrodos.....	70

Figura 29 Superfície de resposta da penetração do cordão de solda em relação da Tocha TIG e distância entre os eletrodos..... 71
Figura 30 Superfície de resposta da largura do cordão de solda em relação da Tocha TIG e distância entre os eletrodos..... 73
Figura 31 Superfície de resposta do reforço do cordão de solda em relação da Tocha TIG e distância entre os eletrodos..... 74
Figura 32 Superfície de resposta do ângulo de convexidade do cordão de solda em relação da Tocha TIG e distância entre os eletrodos..... 75
Figura 33 Penetração do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG..... 80
Figura 34 Área fundida do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG..... 82
Figura 35 Largura do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG..... 83
Figura 36 Reforço do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG..... 84
Figura 37 Ângulo de convexidade do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG..... 86
Figura A.1 Sistema Elétrico..... 98
Figura A.2 Sistema de Aquisição montado na bancada..... 98
Figura A.3 Diagrama de blocos da programação..... 99
Figura A.4 Interface do Sistema de Aquisição..... 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Sistema de Identificação de Eletrodos.....	21
Tabela 2	Composição química para eletrodos de tungstênio	22
Tabela 3	Formas usuais de transferência de acordo com o IIW.....	28
Tabela 4	Médias e desvio padrão das larguras para cada processo de soldagem.....	33
Tabela 5	Descrição das variáveis e níveis.....	45
Tabela 6	Planejamento fatorial com variáveis codificadas.....	46
Tabela 7	Valores das variáveis ajustadas para cada teste.....	47
Tabela 8	Valores médios de corrente e tensão monitorados para os testes.....	50
Tabela 9	Resultados das medições dos parâmetros geométricos dos cordões de solda.....	51
Tabela 10	Ajuste das condições de soldagem.....	67
Tabela 11	Valores monitorados dos sinais de corrente e tensão.....	68
Tabela 12	Resultados das medições dos parâmetros geométricos dos cordões de solda.....	69
Tabela 13	Parâmetros que variaram.....	77
Tabela 14	Ajuste das condições de soldagem.....	77
Tabela 15	Valores Reais de corrente e tensão.....	78
Tabela 16	Resultados das medições dos parâmetros geométricos dos cordões de solda.....	79
Tabela B.1	Medida 1 - capítulo IV.....	102
Tabela B.2	Medida 2 – Capítulo IV.....	103
Tabela C.1	Medida 1 - capítulo V.....	104
Tabela C.2	Medida 2 – Capítulo V.....	105
Tabela D.1	Medida 1 - capítulo VI.....	106
Tabela D.2	Medida 2 - capítulo VI.....	107

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A - Ângulo de convexidade do cordão de solda;

AD - Área depositada;

AWS - *American Welding Society;*

AF - Área fundida;

AR - Argônio;

IIW - *Intenational Institute of Welding;*

MIG/MAG - *Metal Inert Gas / Metal Active Gas;*

CA - Corrente alternada;

CC - Corrente contínua;

CCD - *Central Composite Design;*

CE - Cério;

CO_2 - Dióxido de carbono;

DBCP - Distancia do bico de contato;

EW - Eletrodo de Tungstênio;

EWG - Elemento de liga não especificado;

TIG - *Tungsten Inert Gas;*

GMAW - *Gas Metal Arc Welding;*

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*;

HE - Hélio;

L - Largura do cordão de solda;

LA - Latânio;

N_2 - Nitrogênio;

O_2 – Oxigênio;

P - Penetração do cordão de solda;

P - Eletrodo puro de Tungstênio;

PCC - Planejamento Composto Central;

R - Reforço do cordão de solda;

TH -Tório;

ZAC - Zona afetada pelo calor;

ZR - Zircônio.

.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I 15
INTRODUÇÃO 15
1.1 Objetivo 16
1.2 Justificativa 16
CAPÍTULO II 19
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 Processo de Soldagem TIG 19
2.1.1 Eletrodos 21
2.1.2 Parâmetros de soldagem TIG 23
2.2 Processo de soldagem MIG/MAG 24
2.2.1 Introdução 24
2.2.2 Modos de transferência metálica 27
2.2.3 Gases para o processo 29
2.3 Processo de Soldagem TIG-MIG/MAG. 29
2.3.1 Introdução 30
2.3.2 Estudos processo associado TIG-MIG/MAG 31
2.3.2.1 Estudos dos parâmetros que interferem na soldagem híbrida. 31
2.3.2.2 Construção de uma tocha ideal para soldagem TIG-MIG/MAG 34
CAPÍTULO III 36
EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL 36
3.1 Bancada Experimental 36
3.1.2 Fontes de soldagem para o processo TIG-MIG/MAG. 37
3.1.3 Tocha TIG-MIG/MAG 38
3.1.4 Sistema de Refrigeração 39
3.1.5 Bancada de soldagem mecanizada 40
3.2 Preparação dos corpos de prova para soldagem 41
3.2.1 Consumíveis 41
3.2.2 Macrografia do cordão de solda 41
3.3 Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados 42

3.4 Procedimento de Soldagem 42
CAPÍTULO IV 44
ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO TIG-MIG/MAG 44
4.1 Planejamento dos Experimentos 44
4.2 Resultados e discussões 48
4.2.1 Área fundida do cordão de solda no metal de base 52
4.2.2 Área de metal depositado 54
4.2.3 Penetração do cordão de solda 55
4.2.4 Largura do Cordão de Solda 57
4.2.5 Reforço do Cordão de Solda 59
4.2.6 Ângulo de convexidade 61
4.3 Considerações Finais 63
CAPITULO V 64
INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DA TOCHA TIG E DA DISTÂNCIA ENTRE OS ELETRODOS TIG E MIG/MAG SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA 64
5.1 Planejamento dos Experimentos 64
5.1.2 Condições de realização dos testes. 66
5.2 Resultados e Discussões 67
5.2.1 Análise da Área Fundida do Cordão de Solda 69
5.2.2 Análise da Penetração do Cordão de Solda 71
5.2.3 Análise da Largura e Reforço do Cordão de Solda 72
5.2.4 Análise do Ângulo de Convexidade do Cordão de Solda 74
5.3 Considerações Finais 75
CAPITULO VI 76
INFLUÊNCIA DAS CORRENTES DE SOLDAGEM DO PROCESSO TIG-MIG/MAG SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA 76
6.1 Planejamento dos Experimentos 76
6.2 Resultados e Discussões 78
6.2.1 Análise da penetração do cordão de solda 79
6.2.2 Análise da Área Fundida do Cordão de Solda 81
6.2.3 Análise da Largura do cordão de solda 82
6.2.4 Análise do reforço do cordão de solda 84
6.2.5 Análise do ângulo de convexidade do cordão de solda 85

6.3 Considerações Finais 86
CAPITULO VII 88
CONCLUSÕES 88
CAPÍTULO VIII 90
PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS 90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 91
APÊNDICE A 97
SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS 97
APÊNDICE B 101
Medidas Geométricas Referentes aos Testes do Capítulo IV 101
APÊNDICE C 104
Medidas Geométrica Referentes aos Testes do Capítulo V 104
APÊNDICE D 106
Medidas Geométrica Referentes aos Testes do Capítulo VI 106

~

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A combinação de dois ou mais processos convencionais de soldagem constituem os chamados “Processos híbridos de soldagem”. O nascimento de tal grupo ocorreu a partir da necessidade de suprir as limitações existentes nos métodos convencionais, com o propósito de melhorar a qualidade, a produtividade e as tolerância envolvidas no processo, além de criar alternativas na união de metais.

Qualquer prática convencional tem suas próprias vantagens e limitações, e os processos associados tentam unir as vantagens que os originaram. A combinação de dois ou mais procedimentos convencionais feitos de maneira sinérgica, vem provando ser uma resposta para superar as limitações existentes nos processos convencionais individuais (SAHASRABUDHE et al., 2018; ZHANG et al., 2017).

Autores como Messler (2004), Dykhno e Davis (2006) defendem os processos híbridos como uma alternativa para melhorar parâmetros da soldagem, os quais beneficiarão para um melhor desempenho. De acordo com os autores, é possível melhorar a capacidade de realizar soldas com maiores velocidades e reduzir a quantidade de respingos, levando a um aumento da capacidade de produção e, consequentemente, expandir a produtividade.

Neste âmbito, o processo de soldagem TIG-MIG/MAG vem se destacando por ser executado a partir da combinação dos equipamentos já utilizados nos processos convencionais TIG e MIG/MAG. Esse aspecto permite que qualquer indústria ou laboratório que possuam os equipamentos necessários para a realização dos processos TIG e MIG/MAG convencionais, sejam capazes de operar o processo TIG-MIG/MAG.

A soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) e a soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) são os processos mais populares de soldagem a arco, utilizado em diversos campos industriais. Quando comparados, a soldagem MIG/MAG possuiu alta eficácia de deposição em relação à soldagem TIG, porém ainda são necessárias melhorias no processo,

no sentido de reduzir os respingos e melhorar a estabilidade do arco MIG/MAG (KANEMARU et al., 2013).

O processo TIG, por sua vez, possui alta qualidade, tem características de menos respingos e melhor qualidade do cordão de solda produzido. Entretanto, é importante melhorias principalmente se tratando de eficiência de fusão, pois se trata de um processo realizado com velocidade lenta e de baixa deposição de metal quando comparado ao processo MIG/MAG (KANEMARU et al., 2013).

As limitações e os pontos positivos dos processos TIG e MIG/MAG, juntamente com a praticidade de operação, fundamentam a união dos dois processos. Meng (2014), Dyknho e Davis (2006), acreditam que essa associação aumenta a penetração da solda, e intensifica a velocidade de soldagem, além de oferecer maior controle sobre a zona afetada pelo calor (ZAC), características que quando somadas aumentam a produtividade.

1.1 Objetivo

O objetivo geral do presente trabalho é analisar e identificar parâmetros operacionais para o processo TIG-MIG/MAG e a partir desses preceitos, verificar suas influências sobre a geometria do cordão de solda produzido.

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Implementar o processo TIG-MIG/MAG no Laboratório de Fabricação Mecânica da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão;
- Investigar as variáveis do processo TIG-MIG/MAG;
- Analisar a influência dos parâmetros do processo sobre a geometria do cordão de solda;
- Investigar a influência dos circuitos de correntes do processo TIG-MIG/MAG sobre a geometria do cordão de solda.

1.2 Justificativa

Os recentes avanços tecnológicos, principalmente no tocante controle de fontes eletrônicas, têm incentivado e estimulado o desenvolvimento de novos processos de soldagem, os quais visam atender a uma demanda do setor produtivo por juntas soldadas de alta qualidade e custo reduzido (RESENDE, 2013). Dentro de tal tendência, a combinação de processos de soldagem que é utilizada desde a década de 1970, tem ganhado uma atenção especial pelo fato de oferecer um novo processo que resulta da combinação de dois (ou mais)

processos convencionais e que oferece o efeito de que cada processo é incapaz individualmente (SCHNEIDER et al., 2017).

De acordo com Messler (2004), a combinação de processos de soldagem ou a soldagem híbrida, como é chamada, torna-se interessante quando, a partir da utilização de dois ou mais processos distintos, é criado um processo maior do que são individualmente. Teixeira (2011) afirma que uma forma de aproveitar as vantagens de cada tipo de processo, está na combinação de procedimentos de soldagem. A partir da união desses métodos de soldagem com eletrodo permanente e com eletrodo consumível é possível obter um melhor controle da geometria do cordão de solda dos processos por eletrodo permanente, aliado a produtividade dos processos por eletrodo consumível.

De acordo com Kanemaru et al. (2012), a combinação de TIG com MIG/MAG tornou-se mais vantajosa quando comparado com o LASER, pelo fato de que o equipamento de soldagem a arco elétrico é menos dispendioso, tornando o processo uma alternativa de baixo custo dentre os demais procedimentos associados. A soldagem TIG-MIG/MAG proporciona um aumento de velocidade de soldagem, maior controle sobre a ZAC, uma soldagem mais limpa, com menos respingos e com um cordão de solda com melhores aspectos, além de poder dobrar o desempenho em função do aumento da penetração de solda, ao comparar com os processos convencionais, assim, esses pontos caracterizam o aumento da produtividade (DYKHNO e DAVIS, 2006; MENG, 2014).

Vários autores têm destinado seus estudos para o processo de soldagem híbrido TIG-MIG/MAG. Schneider et al. (2017) estudou a otimização dos parâmetros da soldagem híbrida TIG-MIG/MAG usando o método Taguchi; Teixeira (2011), também analisou a influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda; Chen et al. (2014) examinou as melhorias dos modelos de fontes de soldagem para processo TIG-MIG/MAG; Mishima et al. (2013) realizou uma simulação numérica sobre as propriedades do plasma no processo de soldagem TIG-MIG/MAG; Ding (2015), utilizou o processo TIG-MIG/MAG para soldar materiais diferentes (aços inoxidáveis ferríticos e ligas de magnésio com camada de cobre); Zhang et al. (2016) também utilizou a soldagem híbrida TIG-MIG/MAG para unir materiais diferentes.

Os processos de soldagem TIG e MIG/MAG operando em conjunto, justifica-se pelo fato de que uma solução relativamente simples, pode representar um aumento de produtividade na indústria através da obtenção de cordão de solda com boa qualidade, necessitando de menor tempo e com uma alta repetitividade para toda a aplicação (TEIXEIRA, 2011).

Desta forma, a proposição deste trabalho é uma investigação mais aprofundada dos pontos citados nos objetivos, e certamente contribuirá de forma significativa para o desenvolvimento do conhecimento e do potencial de aplicações desse processo no meio

produtivo, contribuindo para uma possível e promissora viabilização de sua aplicação nos diversos segmentos da indústria.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica tem por finalidade reunir materiais teóricos sobre o processo de soldagem híbrido TIG-MIG/MAG, a fim de auxiliar e servir de base técnica e científica para o entendimento dos princípios básicos e comparação dos resultados finais para possíveis análises.

Serão apresentadas neste capítulo, separadamente, as principais características dos processos TIG e MIG/MAG convencionais e, em seguida, será exibido o processo de soldagem híbrido TIG-MIG/MAG com suas características, princípios de funcionamento e parâmetros.

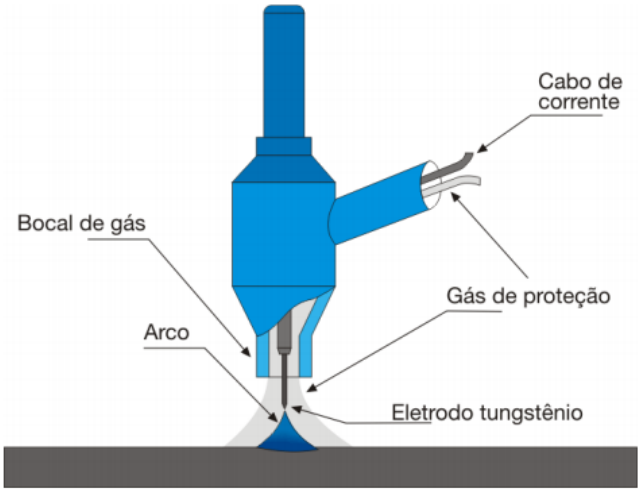
2.1 Processo de Soldagem TIG

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), também conhecido como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), produz a união de peças metálicas, através do aquecimento e da fusão dessas peças. O processo acontece por meio de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e a peça a unir. Durante o processo pode ocorrer a contaminação da poça de fusão pela atmosfera, o que seria indesejável. Portanto, para impedir isto, é utilizado uma nuvem ou uma mistura de gáses inertes como proteção da poça e do eletrodo de tungstênio (MARQUES et al., 2009). A Figura 1 mostra, a seguir, o esquema do processo de soldagem TIG.

É possível aplicar o processo TIG na união de numerosos metais e ligas e obter um ótimo resultado. Além de ser apropriado para aplicações a soldagem de chapas, tubos e peças fundidas para uso na indústria nuclear, aeroespacial, geração de energia, construção naval e outras indústrias, o processo garante qualidade de soldagem superior e quase livre de defeitos

uma vez que o eletrodo, arco e metal fundido são protegidos por um envelope inerte de argônio ou gás hélio (TSENG, 2013).

Figura 1 – Esquema do processo de soldagem TIG



Fonte: (CUNHA, 2008)

O processo possui uma vasta aplicação na qual pode ser aplicado em todos os tipos de juntas, sendo realizado de forma manual, por métodos mecânicos ou automatizados. Levando em conta que o processo seja aplicado de forma correta, é possível conseguir soldas de altíssima qualidade, sem respingos, pois não ocorre a transferência de metal de adição através do arco e requer pouca - ou nenhuma - limpeza após a soldagem (GROOVER, 2012).

O processo de soldagem TIG pode ser realizado sem adição de material de preenchimento, denominada “soldagem autógena”, ou, se necessário, com adição de material de preenchimento. A profundidade de penetração do processo TIG é considerada inferior quando comparado a outros processos, isso se dá pela falta da capacidade de penetração da soldagem TIG e devido ao fato de que esse processo é livre de escórias e de qualquer outra inclusão (SINGH et al., 2017).

O processo de soldagem TIG, é considerado um processo de baixa velocidade, porém, a partir do desenvolvimento de técnicas especificas é possível viabilizar a utilização do processo em situações que demandem elevadas velocidades de soldagem, o que torna o processo competitivo se tratando em termos de velocidade, podendo ainda apresentar menores custos quando comparado a processos que são considerados de maior produtividade e que utilizam material de adição (SCHWEDERSKY et al., 2011).

Uma das principais características do processo é o controle da energia transferida para a peça enquanto ocorre a soldagem, esse controle decorre independentemente da forma que o operador tem da fonte de calor e do metal de adição, os quais agem diretamente no processo, tornando-o adequado para soldas em peças de pequenas espessuras. Um bom controle dessa variável gera pouca escória, o que facilita a visão do soldador durante o processo que ajuda a impedir a geração de fumos nocivos. Outro ponto positivo é o arco elétrico estável, concentrado e suave, facilitando para a produção de soldas com boa qualidade e bom acabamento, além disso, o arco elétrico não gera salpicos, pois não há transferência de metal (TEIXEIRA, 2011).

2.1.1 Eletrodos

A escolha do tipo de eletrodo a ser utilizado é um parâmetro de relevante importância, pois influencia no perfil do cordão de solda. O eletrodo puro de tungstênio, possui menor penetração quando comparado ao eletrodo de tungstênio com Tório e isso se dá por suas características, as quais aumentam a qualidade da emissão de eletrodos no arco, facilitando sua abertura e soldagens com velocidades maiores. Outra característica desse tipo de eletrodo é sua capacidade de operar muito abaixo da sua temperatura de fusão, o que significa baixo desgaste e baixo risco de contaminação (SOUZA, 2016).

O Tungstênio é frequentemente utilizado com a mistura de outros metais especiais ou compostos metálicos, essa mistura é propícia para melhorar algumas características específicas. Para a identificação dos eletrodos, foi desenvolvido um sistema no qual cada um possui uma marca (cor) na sua extremidade (ANTUNES, 1999), conforme tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Sistema de identificação de eletrodos

Classificação AWS	Cor
EWP	Verde
EWCe-2	Laranja
EWLa-1	Preto
EWTh-1	Amarelo
EWTh-2	Vermelho
EWZr-1	Marrom
EWG	Cinza

Fonte: (ANTUNES, 1992).

Tabela 2 – Composição química para eletrodos de Tungstênio

Classificação AWS	W min.(*)	CeO_2	La_2O_3	ThO_2	ZrO_2	Total de outros Elementos ou Óxidos
EWP	99.5	_	_	_	_	0.5
EWCe-2	97.3	1.8 - 2.2	_	_	_	0.5
EWLa-1	98.3	_	0.9 - 1.2	_	_	0.5
EWTh-1	98.3	_	_	0.8 - 1.2	_	0.5
EWTh-2	97.3	_	_	1.7 - 2.2	_	0.5
EWZr-1	99.1	_	_	_	0.15 - 0.4	0.5
EWG	94.5	Não Especificado				

Fonte: (ANTUNES, 1992).

Os eletrodos são designados por EW, indicando que trata-se de um eletrodo de tungstênio (W). Em seguida, a próxima letra significa o símbolo do elemento de liga que compõe o eletrodo, como exemplo Cério (Ce), Lantânio (La), Tório (Th) ou Zircônio (Zr) e o número indicando o percentual aproximado desse elemento. A letra P é utilizada para indicar que o eletrodo de tungstênio é puro e a designação EWG indica que o elemento de liga não é especificado (FOGAGNOLO, 2011).

Ainda segundo Fogagnolo (2011), cada eletrodo possui suas características:

- Os eletrodos EWP, são de baixo custo e que contem no mínimo 99,5% de W, no qual oferecem uma boa estabilidade de arco se utilizado com corrente alternada, além de manter a ponta do eletrodo limpa com formato arredondado e possuir menos capacidade de condução de corrente quando comparado a outros.

- Já os eletrodos EW Th, são de Tungstênio ligados ao Tório, eles oferecem uma melhor abertura do arco e melhora a qualidade da emissão de elétrons. Também conduz correntes mais elevadas, tem vida útil mais longa e são adequados para aplicações com corrente contínua em polaridade direta (CC-) pela dificuldade de manter a ponta arredondada.

- Os eletrodos EW Ce, são de Tungstênio ligados ao Cério, se comparados aos eletrodos puros de Tungstênio e apresentam mais facilidade para abrir o arco e maior estabilidade, além de operar em ambas as polaridades, CA e CC.

- Os eletrodos EW La são de Tungstênio ligados ao Lantânio e suas características e vantagens são semelhantes às dos eletrodos ligados ao Cério.

- Os eletrodos EW Zr são de Tungstênio ligados ao Zircônio. Eles são considerados intermediários quando comparado aos eletrodos de Tungstênio puro e aos eletrodos ligados

com Tório, adequados para aplicações nas quais exigem alta qualidade radiográfica e baixa contaminação de Tungstênio.

Ainda se tratando dos eletrodos, Takano et al. (2008) analisou a importância e o efeito do ângulo do eletrodo de Tungstênio, ele utilizou a afiação do ângulo do eletrodo de 10º e 30º com uma corrente de 100 A. Com os resultados, o autor concluiu que com esses parâmetros, o ângulo do eletrodo não afeta as características avaliadas na dureza dos revestimentos, evidenciando um insignificante efeito sobre a penetração da solda.

Segundo Diaz et al. (2011), os valores para ajuste de recuo do eletrodo em relação ao bocal, vão variar de acordo com o modelo da tocha de soldagem utilizada, e a medida que a variação do recuo do eletrodo acontece, a largura do cordão aumenta, obtendo cordões de solda com menor profundidade de penetração.

2.1.2 Parâmetros de soldagem TIG

Basicamente, as variáveis que determinam o processo são a corrente de soldagem, a tensão do arco, a velocidade de deslocamento da tocha e o gás de proteção. Essas variáveis influenciam na quantidade, distribuição e no controle de calor produzido pelo arco, além de assessorar na sua estabilidade e na remoção do óxido refratário da superfície de alguns metais (CUNHA, 1985). É inegável que essas variáveis não agem especificamente de forma independente, pois podem influenciar umas às outras.

Entre os parâmetros de soldagem, a corrente é um dos que possui maior influência na penetração do cordão de solda, pois depende da intensidade da corrente, ou seja, quanto mais intensa, maior será a penetração. A utilização de alta corrente é mais adequada para soldagem mecanizada, semiautomática ou automática, já a corrente muito baixa pode causar falta de fusão e baixa penetração, e além disso, dificultar a operação quando se tem material de adição (PRITCHARD, 2001). A maior parte das aplicações do processo dentro das indústrias, vai até cerca de 250 A, dentro dessa faixa é possível aumentar a velocidade de soldagem de maneira quase proporcional ao aumento da corrente de soldagem (SCHWEDERSKY et al., 2011).

Teixeira (2011), afirma que a polaridade da corrente afeta tanto a penetração, quanto a distribuição do calor entre o eletrodo e a peça. Para aplicações que necessitem de maior penetração, o essencial é que se utilize a operação por corrente contínua com eletrodo na polaridade negativa, neste caso, o calor gerado está 30% no eletrodo e 70% na peça a ser soldada, resulta uma poça de fusão estreita e profunda, não adequada para peças muito finas. Já a operação por corrente contínua, com eletrodo na polaridade positiva, ocorre o contrário,

o calor está 70% no eletrodo e 30% na peça a ser soldada com uma poça de fusão rasa, larga e de menor penetração.

É necessário, entretanto, preocupar-se com o comprimento do arco elétrico, pois ele deve ser o menor possível, garantindo que seja mais concentrado, entretanto, se for muito pequeno pode ocorrer a contaminação do eletrodo por meio do contato com a peça. O arco é aberto e mantido sobre a peça de trabalho até que um ponto brilhante seja obtido, logo depois ocorre o deslocamento sobre a linha de soldagem, mantendo o comprimento de arco constante (2 a 4 mm). Se o comprimento do arco elétrico for excedente, pode acarretar em problemas como distribuição sobre uma grande área na peça a ser soldada, dificultando a fusão devido à queda na intensidade de corrente e permitindo a entrada de ar atmosférico na poça de fusão (CUNHA, 1985; PRITCHARD, 2001).

A velocidade de soldagem depende da corrente de soldagem, ou seja, quando se necessita de velocidades mais elevadas, torna-se necessário o aumento da corrente de soldagem, porém, o resultado dessa ação é uma mudança da poça de fusão que na maioria das vezes gera um cordão descontínuo. Da mesma maneira, quando se deseja velocidades menores, deve-se reduzir a corrente de soldagem (SCHWEDERSKY et al., 2011; PRITCHARD, 2001).

De acordo com Teixeira (2011), a escolha do gás de proteção pode influenciar em diversas variáveis como a estabilidade do arco, a geometria do cordão de solda, a proteção da poça de fusão, a transferência de calor e também na velocidade de soldagem. Os principais tipos de gases de proteção usados na soldagem TIG são inertes, principalmente o argônio e o hélio ou a mistura destes. Marques et al. (2009), completa que em casos específicos, é utilizado uma mistura especial como as que contem hidrogênio. A seleção correta do gás de proteção como a pureza dos gases utilizados é de grande importância para a qualidade da solda.

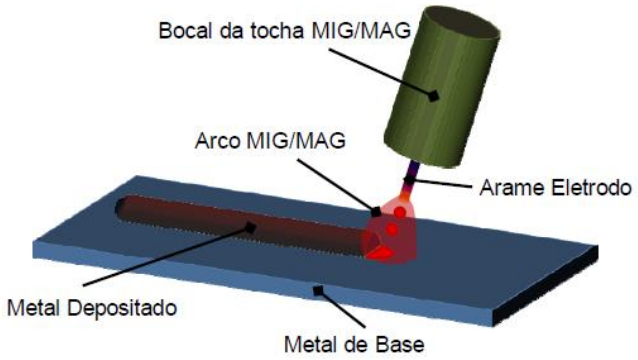
2.2 Processo de soldagem MIG/MAG

2.2.1 Introdução

O processo de soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*, ou GMAW – *Gas Metal Arc Welding*) é definido como um processo de soldagem a arco, a qual utiliza um arco entre um arame-eletrodo de alimentação contínua e uma poça de fusão. É feita a proteção da região da solda através de uma atmosfera protetora de gás inerte (comercialmente, Ar e He), ativo (usualmente CO_2 puro) ou a mistura deles (no caso, incluindo como gás ativo o O_2 e o N_2) (AWS, 1991; SCOTTI e PONOMAREV, 2008). A Figura

2, mostra esquematicamente um bocal da tocha, arame eletrodo e arco MIG/MAG mais metal de base e metal depositado.

Figura 2 – Vista esquemática de um bocal da tocha, arame eletrodo e arco MIG/MAG mais metal de base e metal depositado



Fonte: (RESENDE, 2009)

O processo de soldagem MIG/MAG é de grande importância para a área de fabricação, a ponto de se tornar um dos processos mais utilizados na indústria. A grande disputa do mercado exige o maior grau possível de produtividade (automatização) das operações e de resultados satisfatórios. Devido a relevância do processo MIG/MAG, há uma necessidade de garantir uma boa qualidade dos cordões de solda (SOUZA et al., 2011; SILVA, 2005).

Essa evidência do processo MIG/MAG na indústria, se manifestou em função da grande capacidade produtiva que o processo possui, além da alta densidade de corrente que consequentemente assegura uma elevada taxa de fusão, alto fator de trabalho e automatização do trabalho (SOUZA; FERRARESI, 2013).

Devido a facilidade de automação do processo e a ampla diversidade de materiais que podem ser soldados por este método, encontra-se inúmeras e incontestáveis aplicações na indústria. Sejam elas automotivas, autopeças, alimentícias, caldeirarias, implementos agrícolas, construção civil ou fabricação de bens de consumo, são sempre exemplos de indústrias que utilizam abundantemente deste processo de fabricação (TATAGIBA et al., 2012)

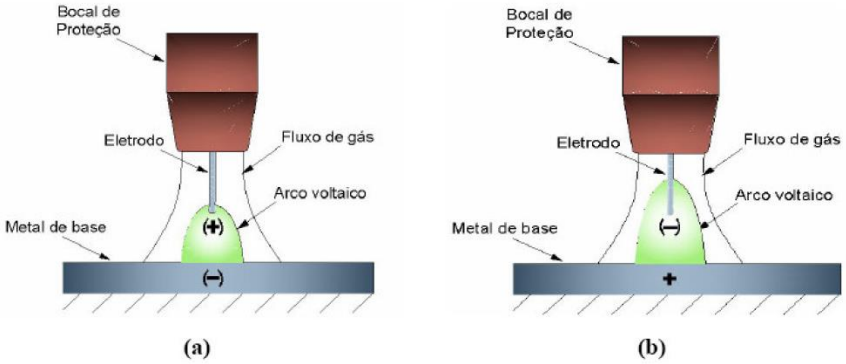
Dependendo das características desejáveis, utilizar o processo MIG/MAG convencional com corrente contínua e eletrodo ligado ao polo negativo (CC-) ou utilizar o processo com corrente contínua e eletrodo ligado ao polo positivo (CC+), pode variar consideravelmente os resultados. As principais diferenças e mais notáveis, são encontradas

na transferência metálica, na taxa de fusão de arame-eletrodo e na geometria do cordão de solda resultante (CIRINO, 2009).

Ainda segundo Cirino (2009), há diferença na profundidade de penetração da zona fundida quando comparados os dois processos. No MIG/MAG CC-, a penetração é menor em relação a outra realizada com MIG/MAG CC+ e isso ocorre porque o processo CC- possui menor energia de soldagem imposta à peça, podendo ser um aspecto indesejável na maioria das aplicações onde há a necessidade de junção de duas peças.

Dessa forma, aplicando o processo convencional com o eletrodo conectado ao polo positivo da fonte, consegue-se grande profundidade de penetração, boa estabilidade do arco e da transferência, quantidade de respingos relativamente pequena, além de possibilitar uma solda com diferentes modos de transferência metálica (curto-circuito, globular e as várias formas da transferência goticular - *spray*) (SOUZA et al., 2009). A Figura 3 ilustra o comportamento do arco MIG/MAG em CC+ e CC-.

Figura 3 - (a) Comportamento do arco em CC+ e (b) em CC-



Fonte: (CIRINO, 2009)

O calor de fusão analisado do ponto de vista da capacidade de produção é um parâmetro de extrema importância para um determinado processo, pois é associado a eficiência do calor para formar um cordão de solda. Dessa forma, o aperfeiçoamento dos processos de soldagem a arco, como o MIG/MAG, estão claramente vinculadas ao rendimento de fusão. Conforme o rendimento de fusão aumenta, o volume de solda também se eleva para uma mesma energia despendida e quanto maior a energia de soldagem, maior será o volume da poça fundida (HIRATA et al., 2014).

Outro aspecto restritivo do processo MIG/MAG é a maneira como o material é transferido da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão. Essa transferência ocorre

por meio de gotas de metal fundido, colocados na ponta do arame-eletrodo, onde recebe influência de vários fatores como o material e o diâmetro do eletrodo, pelo gás de proteção, intensidade e polaridade da corrente de soldagem, pelo comprimento do arco e pela pressão ambiente (SCOTTI e PONOMAREV, 2008). De acordo com Norrish (1992), tais aspectos interferem na estabilidade do processo, na geração de respingos, na qualidade da solda e na capacidade posicional do processo.

2.2.2 Modos de transferência metálica

O modo pelo qual o metal fundido é transferido do eletrodo para a poça de fusão, influencia diretamente em inúmeros aspectos operacionais da soldagem, entre eles, o nível de respingos e fumos, a competência do processo quando utilizado fora da posição plana, a forma do cordão de solda e, por fim, a invariabilidade e o comportamento operacional do processo (MODENESI, 2000).

Diversos fatores influenciam na forma de transferência como, por exemplo, os parâmetros elétricos do arco (tipo e valor da corrente, tensão e polaridade), a formulação do metal de adição, as características do gás de proteção, o comprimento energizado do eletrodo, a pressão atmosférica e entre outros (STARLING e MODENEZI, 2006). A Tabela 3 apresenta as formas usuais de transferência de acordo com o *International Insitute of Welding* (IIW), AWS (1991).

Para o processo MIG/MAG, a transferência de metal natural apresenta dois mecanismos, os quais representam duas classes: na primeira ocorre o contato da gota com a poça antes do deslocamento que é denominado transferência por curto circuito, na segunda classe, a gota destaca-se antes do contato com a poça que é caracterizado como transferência por voo livre e ainda subdivide em seis diferentes modos que são reconhecidas por suas particularidades como a formação e o destacamento das gotas (SCOTTI e PONOMAREV, 2008). Entretanto, considera-se três formas principais: Transferência por Curto-Circuito, Transferência Globular e Transferência por "*Spray*" (Aerosol ou Goticular) (MODENESI, 2000).

Tabela 3 - Formas usuais de transferência de acordo com o IIW

Tipo de Transferência	Exemplo de Processo de Soldagem
1. Queda Livre (Free Flight Tranfer):	
1.1. Globular (Globular)	
1.1.1. Globular (Drop)	GMAW - baixa corrente
1.1.2. Repelida (Repelled)	GMAW com proteção de CO_2
1.2. Goticular ou Aerossol (Spray)	
1.2.1. Axial (Projected)	GMAW - corrente intermediária
1.2.2. Com Alongamento (Streaming)	GMAW - corrente média
1.2.3. Rotacional (Rotating)	GMAW - corrente elevada
1.3. Explosiva (Explosive)	SMAW (eletrodos revestidos)
2. Por Contato (Bridging Transfer)	
2.1. Curto-circuito (Short-circuiting)	GMAW - arco "curto"
2.2. Contínua (Without Interruption)	GTAW com alimentação contínua
3. Protegida por Escória (Slag Protected Transfer):	
3.1. Guiada pela parede (Flux-Wall Guided)	SAW
3.2. Outros modos (Other modes)	SMAW, FCAW, ESW, etc

Fonte: (AWS, 1991).

A Transferência por Curto-Circuito é a mais utilizada na soldagem com correntes baixas a moderadas e de baixas tensões. Produz um comprimento do arco suficientemente curto e uma poça de fusão relativamente pequena, o que torna o processo indicado para a soldagem de seções finas ou soldagens fora da posição plana. O curto-circuito é estabelecido a partir da formação de uma gota de metal fundido na ponta do eletrodo, o qual atinge periodicamente a poça de fusão, anulando o arco durante o curto-circuito, assim, a corrente se eleva rapidamente e gera uma maior fusão do eletrodo, enquanto ocorre, ao mesmo tempo, a transferência do metal fundido para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética (MODENESI, 2000).

A Transferência Globular acontece com correntes mais baixas e com tensões mais elevadas. O processo possui grande instabilidade e um elevado nível de respingos, em função de uma baixa corrente, a qual restringe a sua aplicação a chapas finas e a posição plana, no qual pode ser obtido por outros modos de transferência mais estáveis, como o curto-circuito natural e a pulsada controlada (VILARINHO, 2007; RESENDE et al., 2009).

A Transferência Goticular é reconhecida pela transferência de pequenas gotas uniformes e de forma sequencial (não pulverizada) em alta frequência, que possui um diâmetro próximo ao do eletrodo. Por suas peculiaridades, os oscilogramas de corrente e tensão não apresentam alterações significativas dos sinais, o mecanismo é desenvolvido com polaridade positiva para soldagem MIG/MAG, com altas correntes (forças eletromagnéticas

altas) e tensões elevadas, o que garante um arco suficientemente longo (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

2.2.3 Gases para o processo

O tipo de gás de proteção utilizado durante o processo, interfere na escolha do modo de transferência. Segundo Starling e Modenezi (2006), os tipos de gases de proteção mais utilizados são o dióxido de carbono como gás ativo e o argônio e/ou hélio como gases inertes, além de ser possível utilizar as misturas destes, o que vai definir é a propriedade desejada com base nas especificações do fabricante para consumirl.

O dióxido de carbono (CO_2) como o gás ativo, entre os tipos de gases de proteção de solda é o mais barato e o mais utilizado na soldagem MIG/MAG de aço ao carbono com transferência por curto circuito. O efeito global é de gerar uma proteção oxidante, pois o mesmo se dissocia no arco para formar CO e O, exibindo em temperatura ambiente as características de gás inerte e não reagindo com outros elementos, entretanto, trata-se de um gás ativo nas temperaturas de soldagem. Também é responsável por uma alta transferência de calor para o metal base devido sua alta condutividade, auxiliando em um padrão de penetração mais largo e arredondado quando comparado ao argônio (LYTTLE, 1990; FILHO et al., 2007).

O argônio (Ar) é um gás inerte que possui baixo potencial de ionização, baixo potencial de oxidação e baixa condutividade térmica (FILHO et al., 2007). Segundo Dillenbeck e Castagno (1987), o argônio possui uma alta densidade quando comparado com os outros gases, isso proporciona uma maior eficiência de proteção pela facilidade do argônio em substituir o ar atmosférico em torno da solda, além de facilitar a abertura do arco, melhorar a estabilidade em baixas correntes e ser um processo que permite transferência por "*spray*".

A mistura de argônio (Ar) com pequenas porcentagens de CO_2, produz notável melhora na estabilidade do arco. Além de melhorar a aparência do cordão de solda, dependendo da quantidade a ser adicionada de CO_2, melhora a fluidez da poça de fusão, diminui a corrente de transição e a tendência a trinca de raiz é reduzida. A mistura é utilizada, em aço de carbono, baixa liga e em menor extensão em aços inoxidáveis em aplicações com transferência de curto circuito, mas também com spray e arco pulsado (BRACARENSE, 2003).

2.3 Processo de Soldagem TIG-MIG/MAG.

2.3.1 Introdução

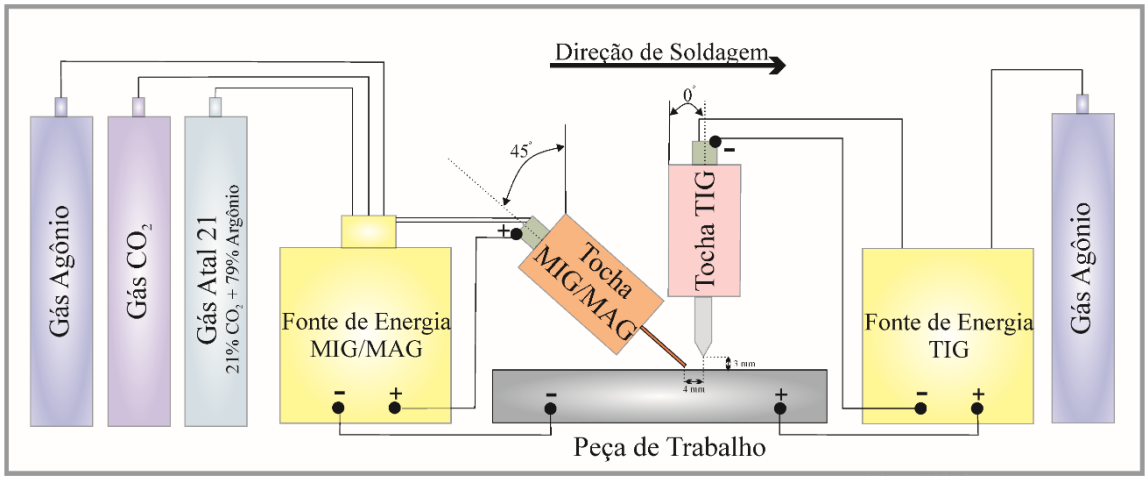
De acordo com Teixeira (2011), a soldagem a arco elétrico pode ser dividida em dois grandes grupos, nos quais dividem os que utilizam eletrodos não consumíveis ou permanentes, como por exemplo dos processos TIG e Plasma e os processos que utilizam eletrodos consumíveis, como os processos MIG/MAG, o arame tubular, o arco submerso e o eletrodo revestido.

A combinação de processos de soldagem com eletrodo permanente e eletrodo consumível é uma maneira de aperfeiçoar as vantagens de cada tipo de processo. Os com eletrodo permanente, permitem uma soldagem com maior atuação na geometria do cordão de solda e tem a tendência de apresentar menor taxa de produção. Já os processos com eletrodos consumíveis, apresentam maior taxa de produtividade em função da energia transferida à peça e não por ser somente oriunda da ação do arco voltaico, mas porque o material em transferência do eletrodo a peça, conjuga também boa parte da energia transferida (OLIVEIRA, 2006).

Os processos associados podem oferecer inúmeras melhorias na soldagem, quando comparado aos processos convencionais, bem como a capacidade de realizar soldas com maiores velocidades, a distorção de peças reduzidas quando a zona afetada pelo calor for menor, soldas mais limpas, além da capacidade de produzir verdadeiras soldas de sobreposição (configuração contínua ou ponto/ponto) (DYKHNO e DAVIS, 2006;). A Figura 4, exemplifica o processo de soldagem TIG e MIG/MAG em um único processo.

O princípio de funcionamento deste sistema de soldagem acontece através da operação das fontes de soldagem e da abertura dos arcos TIG e MIG/MAG, simultaneamente. Além disso, as tochas de soldagem permanecem fixas e a mesa se move automaticamente. O processo TIG utiliza CC-, que auxilia em uma maior penetração e o processo MIG/MAG CC+ obtém maior velocidade de soldagem possível e modo de transferência aerossol. Os resultados dessa combinação é um aumento da rigidez e estabilidade dos arcos elétricos que resultam em maior penetração e possibilidades de maiores velocidades de soldagem quando comparado ao processo de soldagem MIG/MAG convencional (SCHNEIDER et al., 2017; DYKHNO e DAVIS, 2006).

Figura 4 – Combinação dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG em um único processo



Fonte: (Apaptado, SCHNEIDER et al., 2017)

2.3.2 Estudos processo associado TIG-MIG/MAG

Entre os estudos que foram realizados com o processo híbrido TIG-MIG/MAG encontrados na literatura, se destacam as investigações dos parâmetros que interferem diretamente no cordão de solda, na confecção de uma tocha ideal, na utilização e no comportamento da soldagem para distintos materiais e, por fim, no uso de simulação numérica a fim de otimizar parâmetros.

2.3.2.1 Estudos dos parâmetros que interferem na soldagem híbrida.

Schneider et al. (2017) estudou a otimização dos parâmetros da soldagem TIG-MIG/MAG usando o método de Taguchi. O objetivo do autor, foi determinar a influência dos parâmetros de soldagem no processo TIG-MIG/MAG na geometria do cordão de solda e otimizar os fatores para encontrar a melhor solda. Foram variados fatores como o tipo de gás (MIG/MAG), tensão (MIG/MAG), velocidade de alimentação de arame (MIG/MAG), corrente elétrica (TIG), vazão de gás (TIG) e velocidade de soldagem. Como resposta, foram avaliadas as seguintes variáveis de saída: penetração de solda, a zona afetada pelo calor (ZAC), a largura da solda e a altura da solda.

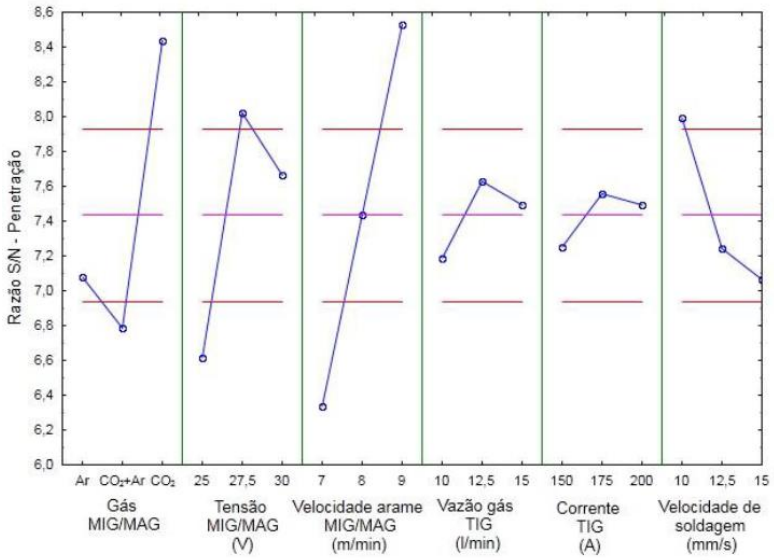
Como resultado, Schneider et al. (2017) afirma que através dos testes experimentais, foi possível otimizar cada uma das variáveis de saída estudada. Os fatores que tiveram influências mais significativas na penetração, foram o tipo de gás de proteção (MIG/MAG), a

tensão (MIG/MAG), a velocidade de alimentação do arame (MIG/MAG) e a velocidade de soldagem. Já no que diz respeito ao cordão de solda, os fatores que tiveram maior efeito sobre a largura do cordão de solda foram o tipo de gás de proteção (MIG/MAG), a tensão (MIG/MAG), o fluxo do gás de proteção (TIG), a intensidade da corrente elétrica (TIG) e a velocidade de soldagem.

Para melhor visualização sobre o comportamento da penetração da solda em relação aos fatores avaliados, os autores apresentam a Figura 5.

Com o propósito de confirmar a otimização obtida, um corpo de prova foi soldado com os fatores mais influentes para a penetração. O CO_2 como gás de proteção para MIG/MAG, tensão MIG/MAG de 27,5 V, alimentação do arame MIG/MAG de 9 m/min, fluxo de gás de proteção TIG a 12,5 l/min e corrente do processo TIG de 175 A. A partir da análise desse corpo de prova, foi possível averiguar uma penetração de 2,96 mm, a qual foi maior quando comparado aos primeiros resultados.

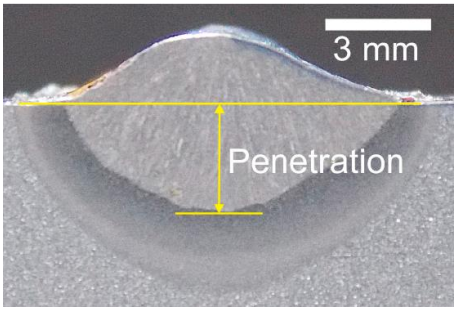
Figura 5 - Efeito dos fatores de soldagem na penetração



Fonte: (SCHNEIDER et al., 2017)

A Figura 6, ilustra a penetração obtida no corpo de prova quando utilizado os parâmetros nos valores indicados.

Figura 6 - Amostra de teste otimizada em relação à penetração da solda



Fonte: (SCHNEIDER et al., 2017)

Teixeira (2011) por sua vez, fez uma análise das influências dos parâmetros de soldagem, sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG-MIG/MAG. A comparação dos resultados, ocorreu através da análise da geometria do cordão de solda. Como variáveis de saída, o autor verificou a influência de cada parâmetro de soldagem na área fundida, bem como a penetração, a largura e o reforço do cordão de solda.

Os resultados adquiridos do processo TIG-MIG/MAG, foram comparados com resultados da soldagem do processo TIG e MIG/MAG convencionais. Os resultados mostraram que, utilizando o processo associado foi possível aumentar os valores dos parâmetros de soldagem, a largura do cordão de solda, a penetração e a área do cordão de solda, os quais foram melhorados utilizando o processo TIG-MIG/MAG.

A Tabela 4 apresenta os valores médios obtidos pelo autor por cada processo para a largura do cordão de solda.

Tabela 4 - Médias e desvios padrão das larguras para cada processo de soldagem

Processo de soldagem	Valor médio da largura do cordão de solda (mm)	Desvio padrão da largura do cordão de solda (mm)
TIG e MAG em tandem	12,65	2,23
TIG convencional	6,04	1,32
MAG convencional	11,38	1,90

Fonte: (TEIXEIRA, 2011).

Uzun (2017) averiguou o efeito da velocidade de soldagem nos processos MIG/MAG e TIG-MIG/MAG em um aço de baixo carbono. Os resultados mostram que a velocidade e o processo de soldagem selecionado, influenciam na penetração e que a razão entre a profundidade de penetração e a largura do cordão de solda é aumentada com o aumento da velocidade de soldagem. Esse aumento é mais evidente na soldagem TIG-MIG/MAG em comparação com a soldagem MIG/MAG convencional, e consequentemente, a microestrutura do metal de solda também foi alterada pela variação da velocidade de soldagem.

Chen et al. (2016) analisou a influência do arco TIG com baixa corrente na soldagem TIG-MIG/MAG de alta velocidade. Depois de realizado os experimentos foi possível afirmar que, independentemente da posição do arco TIG com baixa corrente, a velocidade da solda no processo TIG-MIG/MAG aumenta.

Ainda segundo o autor, o arco MIG/MAG é estabilizado por um arco principal TIG quando o mesmo está à frente, gerando soldas sem respingos, no entanto, MIG/MAG + TIG tem uma estabilidade de soldagem ruim se comparado com a soldagem MIG/MAG convencional, gerando respingos. Entretanto, de acordo com o autor, para conseguir uma melhor eficiência do processo, produtividade e desempenho da solda, o processo de soldagem híbrido TIG-MIG/MAG é recomendado sobre o processo MIG/MAG.

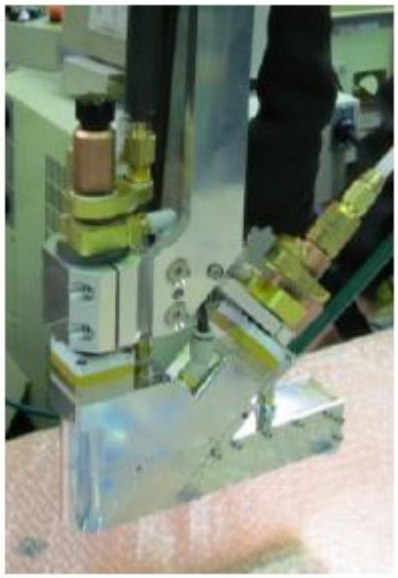
2.3.2.2 Construção de uma tocha ideal para soldagem TIG-MIG/MAG

Kanemaru et al. (2012) realizou um estudo para a soldagem TIG-MIG/MAG, no intuito de analisar experimentalmente as configurações de uma tocha ideal. A determinação da configuração adequada da tocha, se torna difícil devido a ligação entre os parâmetros, porém, é de extrema valia para o tratamento do processo associado.

O objetivo de Kanemaru et al. (2012) foi determinar a configuração ideal da tocha dentro da faixa determinada. Para tal analise, alguns parâmetros foram fixados e a influência do ângulo da tocha e a condição da tocha foram escolhidos para variar. O estudo foi realizado através de simulação numérica e experimental.

A Figura 7, mostra o resultado final da tocha construída para soldagem TIG-MIG/MAG.

Figura 7 - Tocha construída para soldagem TIG-MIG/MAG



Fonte: (KANEMARU et al., 2012)

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

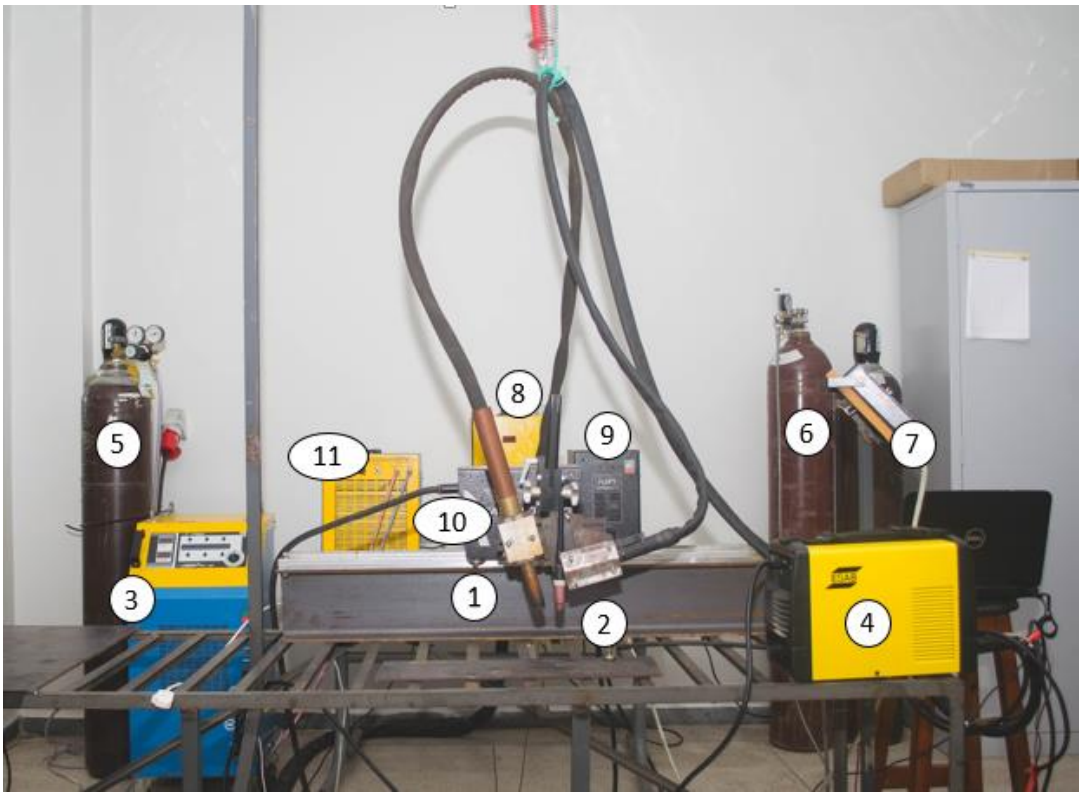
Neste capítulo são apresentados os equipamentos, acessórios e materiais consumíveis que foram utilizados na realização do estudo. Além de apresentar o sistema de aquisição de sinais elétricos de corrente e tensão, a montagem da bancada experimental e a metodologia utilizada na soldagem dos corpos de prova.

3.1 Bancada Experimental

Primeiramente foi montada uma bancada experimental nas dependências do Laboratório de Fabricação Mecânica na Unidade Acadêmica de Engenharia da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão. A bancada experimental foi projetada para operar o processo TIG-MIG/MAG que inclui uma fonte de multiprocessos para executar a parte MIG/MAG do processo, uma fonte inversora para operar a parte TIG do processo e um suporte para integrar as tochas TIG e MIG/MAG convencionais. Para deslocar as tochas foi utilizado um movimentador automático modelo “Tartílope V2”. Para completar o conjunto, foi utilizado um sistema de aquisição dos sinais elétricos de corrente e tensão.

A Figura 8, apresenta a bancada experimental montada, na qual é possível identificar os principais equipamentos e acessórios utilizados para execução dos experimentos. Os componentes identificados na figura são: 1 – tocha MIG/MAG convencional; 2 – tocha TIG convencional; 3 – fonte multiprocessos para operar a parte MIG/MAG; 4 – fonte inversora para operar a parte TIG; 5 – gases para o processo MIG/MAG; 6 – gases para o processo TIG; 7 – controle remoto do movimentador “Tartilope V2”; 8 – alimentador de arame; 9 – módulo eletrônico do movimentador; 10 – módulo trator do movimentador; 11 – sistema de refrigeração.

Figura 8 – Visão geral da bancada experimental



Fonte: (Autor)

3.1.2 Fontes de soldagem para o processo TIG-MIG/MAG.

O processo TIG-MIG/MAG, necessita de duas fontes: uma que opere o processo MIG/MAG e outra que opere o processo TIG, ambos convencionais. Para operar o processo MIG/MAG foi utilizado uma fonte multiprocessos modelo DIGIPlus A7 AC da marca “IMC – Soldagem”, ilustrada na Figura 9 (a). Para operar o processo TIG, foi utilizado uma fonte de solda Inversora - LHN 200 i PLUS 220 V da marca Esab ilustrada na Figura 9 (b).

Figura 9 - (a) Fonte multiprocesso utilizada na parte MIG/MAG do processo; (b) Fonte inversora utilizada na parte TIG do processo

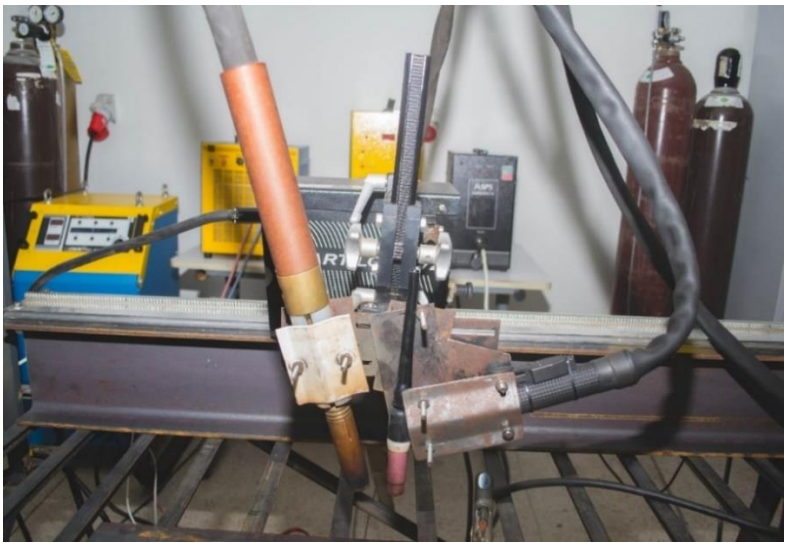
(a) (b)

Fonte: (Autor)

3.1.3 Tocha TIG-MIG/MAG

Neste trabalho, foram utilizadas duas tochas convencionais: uma tocha para soldagem MIG/MAG e outra tocha para soldagem TIG. A Figura 10, ilustra as duas tochas e o mecanismo utilizado para fixação das mesmas, ao dispositivo movimentador.

Figura 10 – Tochas MIG/MAG e TIG montadas em suporte para soldagem TIG-MIG/MAG



Fonte: (Autor)

3.1.4 Sistema de Refrigeração

Com o intuito de operar em condições favoráveis e de reduzir a deterioração dos componentes da tocha, foi empregada uma unidade de refrigeração para a tocha MIG/MAG. A capacidade do reservatório é de aproximadamente 3,5 litros. A Figura 11, apresenta o painel frontal do equipamento.

Figura 11 – Unidade de refrigeração de água, fabricante IMC, modelo: UPR 7500

Fonte: (Autor)

3.1.5 Bancada de soldagem mecanizada

Para realizar o processo de soldagem e execução dos cordões de solda do processo TIG-MIG/MAG, foi utilizado um sistema de movimentação automático para soldagem “Tartilope V2”. Esse manipulador robótico para soldagem, possui deslocamento automático com dois graus de liberdade, sendo o “eixo x” para movimentação longitudinal, e o “eixo y” para movimentação transversal.

O suporte da tocha possui diferentes opções de ajuste, permitindo a regulagem manual da distância entre as tochas de soldagem e a peça. Possui também ajustes de ângulo de ataque e inclinação lateral.

Para o funcionamento desse movimentador é necessário uma fonte e um painel de comando, o qual é controla o disparo e as configurações de velocidade da soldagem. O modelo utilizado, possui controle eletrônico micro processado e interface “Homem Máquina” com display de LCD para seleção dos parâmetros escolhidos. A Figura 12, mostra o dispositivo com suporte universal para as tochas de soldagem, a fonte de disparo e o painel.

Seus componentes básicos são:

- Módulo eletrônico micro processado que processa e controla os movimentos;
- Módulo trator com engrenagem a trilho rígido (os trilhos podem ser fixados em qualquer posição por fixadores magnéticos ou por ventosas);
- Módulo de fixação de tocha com ajustes manuais;
- Controle remoto de programação.

Figura 12 – Movimentador

Fonte: (SPS, 2012)

3.2 Preparação dos corpos de prova para soldagem

Os corpos de prova utilizados, foram preparadas em aço SAE 1020, com comprimento de 200 mm, largura 50,8 mm e espessura de 6,35 mm. Antes da soldagem, os corpos de prova eram escovados manualmente e posicionados sobre a mesa para realização das soldagens de “simples deposição sobre chapa”. Após as soldagens, os corpos de prova eram devidamente identificados e armazenados para que fossem feitas análises posteriormente.

3.2.1 Consumíveis

Como materiais consumíveis para a execução do trabalho, foram utilizados os seguintes itens:

1. Argônio puro como gás de proteção para a parte TIG do processo a uma vazão de 10 l/min;
2. Mistura comercial de Argônio + 8% CO_2 como gás de proteção para a parte MIG/MAG do processo a uma vazão de 12 l/min;
3. Arame eletrodo ER70S-6 de 1,2mm de diâmetro;
4. Eletrodo de Tungstênio classe AWS EWTh-2 com 2% de Tório e 2,4 mm de diâmetro;
5. Barra chata de aço SAE 1020 de dimensões 200 x 50,8 x 6,35 mm.

3.2.2 Macrografia do cordão de solda

Feitas as soldagens, uma das etapas da análise foi a macrografia dos cordões de solda, realizada em quatro etapas, sendo elas: seccionar, embutir, lixar, atacar quimicamente e, finalmente, fotografar. Para a realização dessas etapas, foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. Serra de Fita Horizontal SFH-12, da marca FERRARI, para seccionar os corpos de prova;
2. Politriz, lixadeira de velocidade variável, da marca TECLAGO, e lixa d´água de granulometrias 80, 120, 280, 360, 500 e 600 para lixamento das amostras;
3. Resina para laminação da marca Zanatta para embutimento dos corpos de prova;
4. Reagente Nital a 5%.

5. Microscópio digital para capturar as imagens da área afetada do corpo de prova;
6. Software *ImageJ,* para tratar os dados do corpo de prova.

Assim que realizadas as seções dos corpos de prova, o passo seguinte foi o lixamento da área a ser analisada. Nessa fase, o corpo de prova passou por seis lixas com granulometrias distintas, sendo que a próxima lixa era usada na direção de 90 º da lixa anterior. O processo objetivou uma superfície regular.

Para melhor visualização da área do corpo de prova afetada pela soldagem, foi essencial realizar um tratamento químico. O mesmo foi aplicado na superfície polida do corpo de prova até que ficasse visível a zona afetada. Por fim, com o corpo de prova tratado e a área afetada visível, foi utilizado um microscópio digital para captar as imagens para posteriormente serem analisadas no software *ImageJ*. Nele é possível exibir, editar, analisar e processar imagens digitais.

3.3 Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados

Para garantir uma melhor compreensão e interpretação dos resultados, foi utilizado um sistema de aquisição dos sinais elétricos de corrente e as tensões de ambos os arcos. Os detalhes de construção do sistema de aquisição montado se encontram no Apêndice A.

3.4 Procedimento de Soldagem

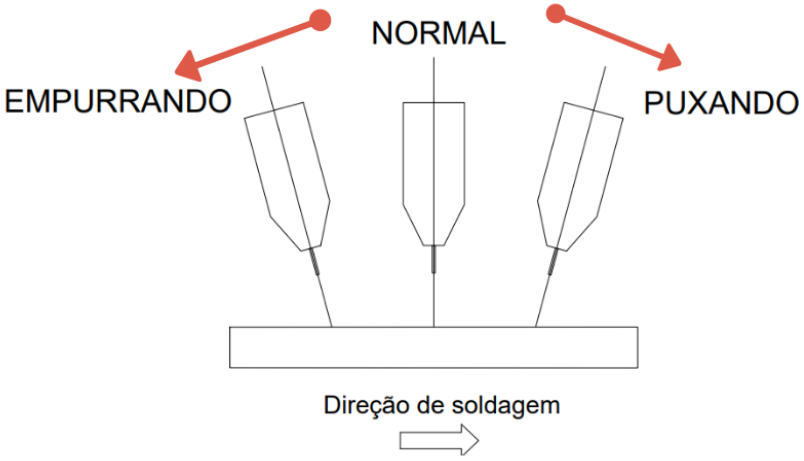
Os testes foram construídos com o processo TIG e MIG/MAG operando simultaneamente. A tocha TIG percorria o caminho de soldagem adiante da tocha MIG/MAG de forma mecanizada, as tochas se movimentavam e os corpos de provas se mantiveram estáticos.

Para iniciar a soldagem, foi necessário regular os parâmetros determinados para o processo MIG/MAG e TIG. O primeiro passo foi configurar as fontes MIG/MAG e TIG. Na fonte do processo MIG/MAG, se indica a tensão utilizada no processo e a velocidade de alimentação do arame habilita o gás de proteção. Logo após configurar a fonte MIG/MAG, o próximo passo é configurar a fonte utilizada no processo TIG estabelecendo o valor da corrente utilizada no processo.

Após determinar os parâmetros elétricos do processo, foi necessário ajustar a parte física: o posicionamento das tochas de soldagem, acionar o gás de proteção do processo TIG, ligar o sistema de refrigeração da tocha MIG/MAG, para que então, dessa forma, fosse

possível iniciar o processo. A tocha MIG/MAG alternou ângulos de ataque sempre na posição “empurrando” e a tocha TIG alternou os ângulos de ataque na posição “puxando” e “normal”. A Figura 13, ilustra o posicionamento das tochas e a direção de soldagem adotada para os testes.

Figura 13 - Posição das tochas de soldagem



Fonte: (Autor)

Com todos os parâmetros configurados, primeiramente foi iniciado o arco TIG. Para abrir o arco TIG, foi utilizado um outro eletrodo auxiliar para estabelecer o contato entre a ponta do eletrodo e a chapa. Com o arco aberto, iniciou-se o movimento das tochas através do controle remoto de programação. Logo em seguida, quando a tocha MIG/MAG se aproximou do início da soldagem, foi acionado o movimento de avanço do arame.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO TIG-MIG/MAG

Neste capítulo são apresentados os resultados preliminares obtidos com o processo de soldagem TIG-MIG/MAG. O principal objetivo deste capítulo é identificar quais variáveis do processo mais influenciam na geometria do cordão de solda. Devido a possibilidade de interação entre as variáveis do processo e a influência de dois arcos sobre a geometria do cordão de solda é necessário entender o efeito de cada uma delas. Também foram identificadas dificuldades operacionais da bancada utilizada e dos equipamentos disponíveis.

4.1 Planejamento dos Experimentos

Os experimentos foram planejados utilizando o fatorial 2^K, na qual são avaliados “k” fatores com dois níveis de cada. A região experimental nestes experimentos, podem ser restritas, porém, podem indicar tendências e determinar uma melhor (ou mais adequada) direção para novos experimentos. E, por fim, os experimentos podem ser “aumentados” com a inclusão de novos níveis e/ou novos fatores (ESTATCAMP, 2018).

As variáveis escolhidas para serem variantes foram: A corrente TIG, o ângulo da tocha TIG, o ângulo da tocha MIG/MAG e a distância entre eletrodos. A escolha dessas variáveis, se deram pelo fato de existir poucas informações sobre a interferência dessas variáveis no processo TIG-MIG/MAG. Outro ponto é o efeito existente dessas variáveis sobre o fluxo de calor para a região de formação do cordão de solda, e, possivelmente, algum efeito na formação do mesmo.

Os níveis superiores e inferiores, utilizados em cada uma da variáveis, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Descrição das variáveis e níveis

Variável	**Descrição**	**Valor (nível) inferior**	**Valor (nível) superior**
X1	Corrente TIG	40A (-1)	140A (+1)
X2	Ângulo da tocha TIG	30º (-1)	0º (+1)
X3	Ângulo da tocha MIG/MAG	-15º empurrando (-1)	-30º empurrando (+1)
X4	Distância entre eletrodos	30mm (-1)	50mm (+1)

Fonte: (Autor).

A Tabela 6 apresenta, de forma codificada, o planejamento fatorial dos experimentos realizados, totalizando 16 testes (quatro variáveis em dois níveis, $2^K = 2^4 = 16$).

Tabela 6 – Planejamento fatorial com variáveis codificadas

Testes	X1	X2	X3	X4
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

Fonte: (Autor).

A Tabela 7, apresenta os mesmos experimentos da Tabela 6 com os valores reais ajustados nos experimentos.

Os demais parâmetros do processo que se mantiveram constantes para todos os experimentos foram:

- Tensão de referência MIG/MAG de 31 V;
- Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP) de 20 mm;
- Velocidade de alimentação arame de 6 m/min;
- Distância da ponta do eletrodo TIG à peça de soldagem de 2 mm;
- Velocidade de soldagem de 38 cm/min;
- Ângulo de afiação do eletrodo TIG de 60º.

A combinação de parâmetros resultou em uma corrente MIG/MAG de aproximadamente 220 A, com oscilogramas de corrente e tensão característicos de transferência metálica do tipo goticular.

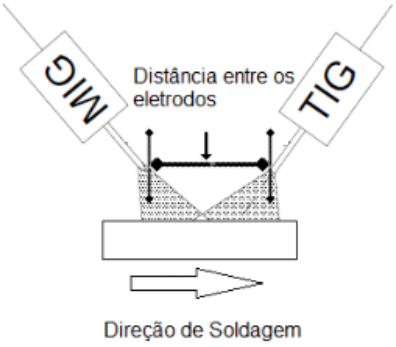
Tabela 7 – Valores das variáveis ajustadas para cada teste

Testes	**Corrente TIG (A)**	**Ângulo tocha TIG (º)**	**Ângulo da tocha MIG/MAG (º)**	**Distância entre os eletrodos (mm)**
1	40	30	-15	30
2	140	30	-15	30
3	40	0	-15	30
4	140	0	-15	30
5	40	30	-30	30
6	140	30	-30	30
7	40	0	-30	30
8	140	0	-30	30
9	40	30	-15	50
10	140	30	-15	50
11	40	0	-15	50
12	140	0	-15	50
13	40	30	-30	50
14	140	30	-30	50
15	40	0	-30	50
16	140	0	-30	50

Fonte: (Autor).

A Figura 14, mostra como foi feita a medida da variável distância entre os eletrodos.

Figura 14 – Medição da variável distância entre os eletrodos

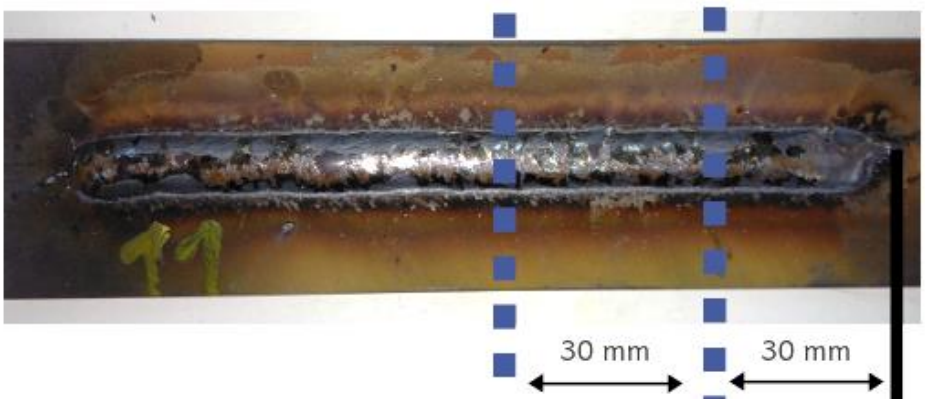


Fonte: (Autor)

4.2 Resultados e discussões

A partir dos experimentos realizados com o processo TIG-MIG/MAG, foram analisados seis parâmetros geométricos do cordão de solda, sendo eles: área depositada, área fundida no metal de base, largura, reforço, penetração e ângulo de convexidade. Para tal análise, são realizadas duas seções nos corpos de prova a 30 mm do fim do cordão de solda e depois a 30 mm da primeira seção, conforme a Figura 15.

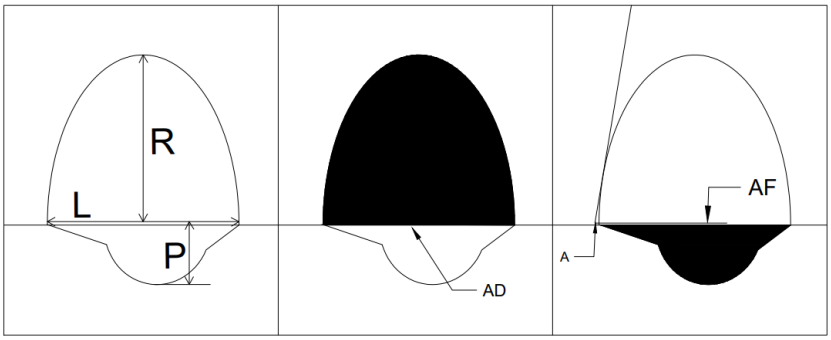
Figura 15 – Seção no corpo de prova



Fonte: (Autor)

A Figura 16, ilustra cada parâmetro medido, sendo eles: R = Reforço, P = Penetração, L= Largura, AD = Área depositada, AF = Área fundida do cordão de solda e A = Ângulo de convexidade do cordão de Solda.

Figura 16 – Vista dos parâmetros geométricos medidos



Fonte: (Autor)

As amostras foram identificadas, cortadas e embutidas. Posteriormente foram levadas para a lixadeira, passando por 6 lixas d'água de granulometrias distintas 80, 120, 280, 360, 500 e 600. Atacadas com Nital a 5% a fim de identificar a área atacada pela solda, fotografadas e medidas no *ImageJ.* A Tabela 8 apresenta os valores de corrente e a tensão obtidos em cada teste

Tabela 8 – Valores médios de corrente e tensão monitorados para os testes

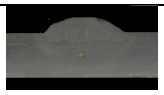
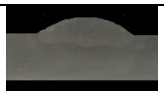
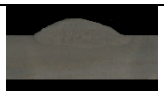
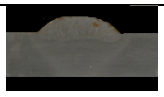
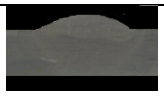
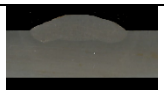
Testes	Corrente TIG (A)	Tensão TIG (V)	Corrente MIG/MAG (A)	Tensão MIG/MAG (V)
1	43,07	10,20	214, 99	30,83
2	141,03	11,75	212,31	30,74
3	42,89	11,82	214,38	30,99
4	139,80	10,79	201,72	30,94
5	42,28	10,41	226,90	31,04
6	135,74	10,73	216,23	30,94
7	40,65	10,23	225,89	30,33
8	141,78	11,92	211,52	30,99
9	40,10	10,34	222,55	30,63
10	145,00	10,35	246,54	31,12
11	38,44	11,28	209,37	30,91
12	137,59	10,57	218,31	31,22
13	37,67	10,73	221,94	31,06
14	139,97	11,16	221,29	31,17
15	40,20	14,75	198,19	30,99
16	136,91	13,13	199,51	30,99

Fonte: (Autor).

A Tabela 9 apresenta os resultados das medições dos parâmetros medidos, no qual: R = Reforço, P = Penetração, L= Largura, AD = Área depositada, AF = Área fundida do cordão de solda e A = Ângulo de convexidade do cordão de Solda.

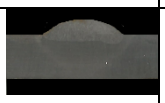
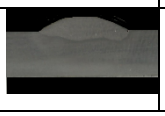
(Continua)

Tabela 9 – Resultados das medições dos parâmetros geométricos dos cordões de solda

Testes	Fotos das Seções	AF (mm²)	AD (mm²)	P (mm)	R (mm)	A (º)	L (mm)
1		$14,45^{\pm0,77}$	$17,58^{\pm0,45}$	$1,45^{\pm0,07}$	$2,30^{\pm0,07}$	$27,30^{\pm0,10}$	$12,33^{\pm0,12}$
2		$19,69^{\pm3,25}$	$17,07^{\pm0,29}$	$2,13^{\pm0,34}$	$2,01^{\pm0.06}$	$34,99^{\pm2,65}$	$13,25^{\pm0,60}$
3		$12,92^{\pm1,30}$	$15,62^{\pm0,52}$	$1,27^{\pm0,14}$	$1,98^{\pm0,12}$	$26,92^{\pm0,23}$	$12,07^{\pm0,39}$
4		$16,24^{\pm1,07}$	$16,79^{\pm0,18}$	$1,8^{\pm0,15}$	$2,37^{\pm0.07}$	$27,50^{\pm1,44}$	$12,59^{\pm0,07}$
5		$18,06^{\pm1,72}$	$17,47^{\pm0,93}$	$1,71^{\pm0,08}$	$2,14^{\pm0.04}$	$29,64^{\pm0,54}$	$12,48^{\pm0,50}$
6		$16,20^{\pm2,19}$	$17,74^{\pm0,47}$	$1,75^{\pm0,33}$	$2,20^{\pm0.04}$	$36,68^{\pm0,84}$	$12,18^{\pm0,35}$
7		$19,72^{\pm1,90}$	$14,23^{\pm0,14}$	$1,80^{\pm0,14}$	$2,03^{\pm0,14}$	$26,90^{\pm0,16}$	$11,71^{\pm0,14}$
8		$16,54^{\pm0,90}$	$18,43^{\pm0,67}$	$1,66^{\pm0,24}$	$2,21^{\pm0,08}$	$29,00^{\pm0,34}$	$12,66^{\pm0,41}$
9		$21,00^{\pm0,39}$	$18,66^{\pm0,04}$	$2,15^{\pm0,18}$	$2,13^{\pm0,15}$	$22,57^{\pm1,53}$	$13,97^{\pm0,10}$
10		$19,09^{\pm1,42}$	$18,10^{\pm1,42}$	$1,96^{\pm0,13}$	$2,30^{\pm0,24}$	$32,39^{\pm2,08}$	$12,85^{\pm0,40}$
11		$13,73^{\pm1,71}$	$18,09^{\pm0,52}$	$1,89^{\pm0,94}$	$2,18^{\pm0.07}$	$35,30^{\pm1,84}$	$11,98^{\pm0,46}$
12		$16,17^{\pm1,81}$	$16,33^{\pm1,15}$	$1,68^{\pm0,29}$	$1,97^{\pm0.06}$	$21,56^{\pm0,07}$	$13,69^{\pm0,24}$
13		$12,39^{\pm0,20}$	$15,14^{\pm0,16}$	$1,59^{\pm0,25}$	$2,05^{\pm0.04}$	$33,15^{\pm3,70}$	$11,23^{\pm0,50}$
14		$16,92^{\pm2,91}$	$17,09^{\pm0,82}$	$1,40^{\pm0,04}$	$2,03^{\pm0,02}$	$29,36^{\pm1,00}$	$12,74^{\pm0,52}$

(Conclusão)

Tabela 9 – Resultados das medições dos parâmetros geométricos dos cordões de solda

Testes	Fotos das Seções	AF (mm²)	AD (mm²)	P (mm)	R (mm)	A (º)	L (mm)
15		$11,29^{\pm0,38}$	$16,67^{\pm0,61}$	$1,26^{\pm0,07}$	$2,10^{\pm0,12}$	$35,43^{\pm0,95}$	$11,70^{\pm0,43}$
16		$12,906^{\pm1,11}$	$17,53^{\pm1,36}$	$1,48^{\pm0,014}$	$2,05^{\pm0,05}$	$27,55^{\pm1,80}$	$12,80^{\pm0,32}$

Fonte: (Autor).

Para entender a interferência de cada um dos parâmetros na geometria no cordão de solda é preciso analisar individualmente os seus efeitos principais e as possíveis interações entre os mesmos. Dessa forma, nos itens que seguem, serão analisados cada parâmetro analisado.

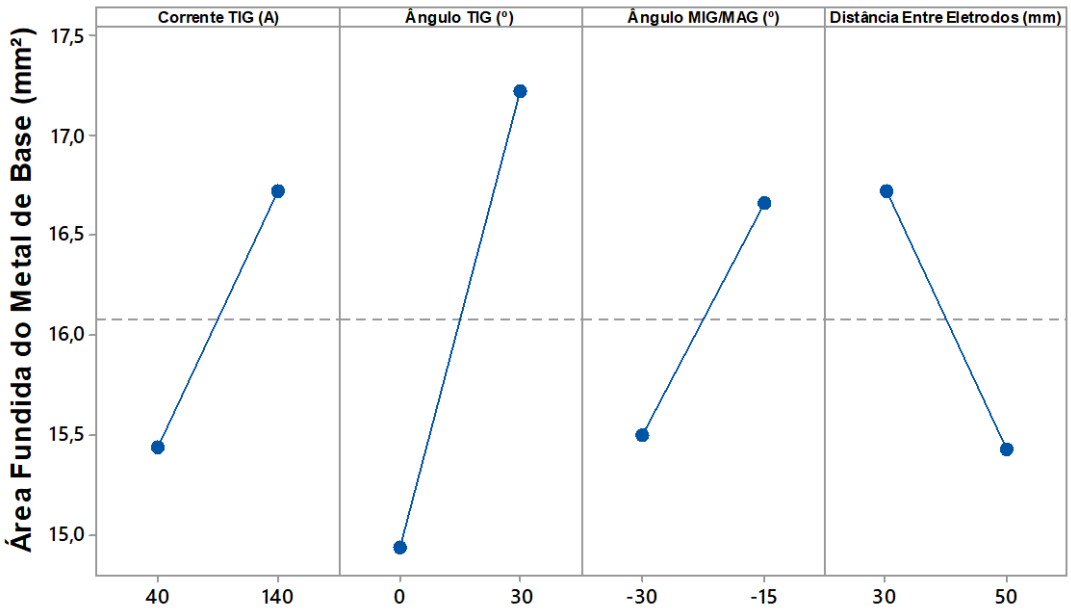
4.2.1 Área fundida do cordão de solda no metal de base

Em relação a área fundida (medida tomada abaixo da superfície da chapa de teste), assim como os outros parâmetros, foram avaliados em função da corrente de soldagem na tocha TIG, da distância entre os eletrodos e do ângulo de posicionamento das tochas. A Figura 17, apresenta os principais efeitos avaliados.

A Figura 17, indica que todas as variáveis avaliadas possuem um efeito principal, afetando a resposta, uma vez que a linha de efeitos não é horizontal. A mudança nas variáveis avaliadas, afetam a resposta, e quanto maior é a inclinação da linha, maior é a magnitude do efeito principal. Uma maior área fundida é obtida ao utilizar, entre os valores avaliados, a distância entre os eletrodos no valor mínimo e as demais variáveis no valor máximo.

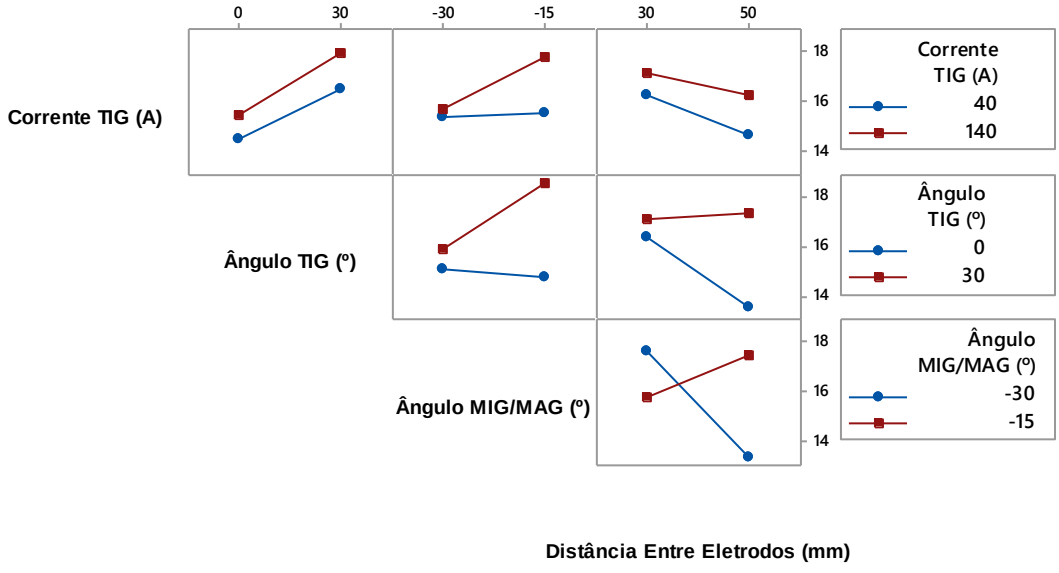
No entanto, os gráficos de efeitos principais, mostrados na Figura 17, não identificam interações entre as variáveis avaliadas. Para tanto, são apresentados os gráficos da Figura 18, para visualizar as interações entre os fatores.

Figura 17 - Gráfico efeitos principais para área fundida do metal de base



Fonte: (Autor)

Figura 18 - Interação para área fundida do metal de base (mm²)



Fonte: (Autor)

Na Figura 18, observa-se um não paralelismo maior, indicando uma maior força de interação entre a distância dos eletrodos com os ângulos das tochas TIG e MIG/MAG e entre o ângulo MIG/MAG com o ângulo da tocha TIG e a corrente TIG.

A formação do cordão de solda está associada ao efeito térmico, a qual sugere que o valor máximo da corrente TIG contribua no sentido de aumentar a área fundida. Uma vez que devido ao maior calor gerado pelo arco, possibilita uma maior fusão do metal de base. Adicionalmente, e não menos importante, o calor fornecido a chapa pelo arco TIG provoca um efeito de pré-aquecimento à frente da poça formada pelo arco MIG/MAG, aumentando assim, o rendimento de fusão do processo TIG-MIG/MAG.

O valor máximo do ângulo da tocha TIG, direciona o calor do arco TIG em direção a região de formação da poça, contribuindo com o aquecimento da região e o aumento da área fundida no metal de base. Esta hipótese sustenta que o calor proveniente do arco TIG, contribui com o arco MIG/MAG no processo de formação do cordão de solda. O ângulo da tocha MIG/MAG, influenciou mais a área fundida do metal de base quando foi utilizado com o valor máximo. A soldagem feita com o arco MIG/MAG na configuração empurrando, provoca um pré-aquecimento à frente da poça que está se formando e com o auxílio do calor do arco TIG em direção a região de formação da poça, essa configuração contribui para uma maior área fundida.

O aumento da distância entre os eletrodos resultou em uma menor área fundida do metal de base. A maior distância entre os eletrodos, permitiu um maior tempo para o calor proveniente do arco TIG se dissipar pela chapa, reduzindo assim, sua contribuição na área fundida.

Teixeira (2011) analisou três valores para a distância entre eletrodos, 30mm, 40mm e 50mm. Conforme o autor, essa variável não esteve entre os principais efeitos para a área do cordão de solda, penetração, largura e reforço do cordão de solda, entretanto essa variável apresentou interação com outras variáveis, como a velocidade de alimentação do arame e a tensão MIG/MAG.

4.2.2 Área de metal depositado

A velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação de arame, se mantiveram constantes durante toda a realização dos testes. Dessa forma, o volume de material depositado por unidade de comprimento é o mesmo para todos os testes, portanto, esse parâmetro será avaliado como constante durante a realização dos testes.

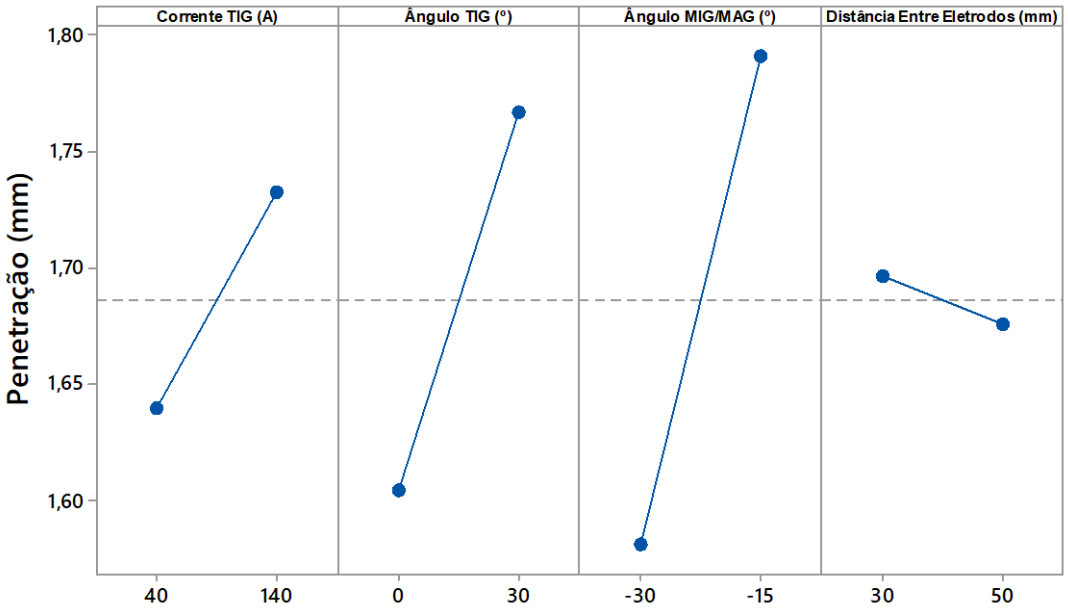
4.2.3 Penetração do cordão de solda

A Figura 19, apresenta as variáveis que tiveram efeito principal no parâmetro geométrico de penetração do cordão de solda.

O gráfico (Figura 19) indica que entre os parâmetros avaliados, a corrente e o ângulo de ambas as tochas, possuem efeito principal, sendo mais considerável para o ângulo da tocha MIG/MAG. Uma maior penetração do cordão de solda é obtida ao utilizar, entre os valores avaliados, corrente TIG e ângulo da tocha TIG nos valores máximos e o ângulo da tocha MIG/MAG e distância entre os eletrodos no valor mínimo.

Kanemaru et al. (2012) analisou o comportamento da corrente TIG e dos ângulos das tochas TIG e MIG/MAG. Como resultado, a maior penetração alcançada foi com a intensidade de corrente TIG no valor máximo e o ângulo da tocha TIG na posição 0º e tocha MIG/MAG em 30º. Segundo o autor, a tendência para o aumento da profundidade de penetração pela corrente TIG, foi quase a mesma em cada ângulo das tochas.

Figura 19 - Gráfico efeitos principais para penetração



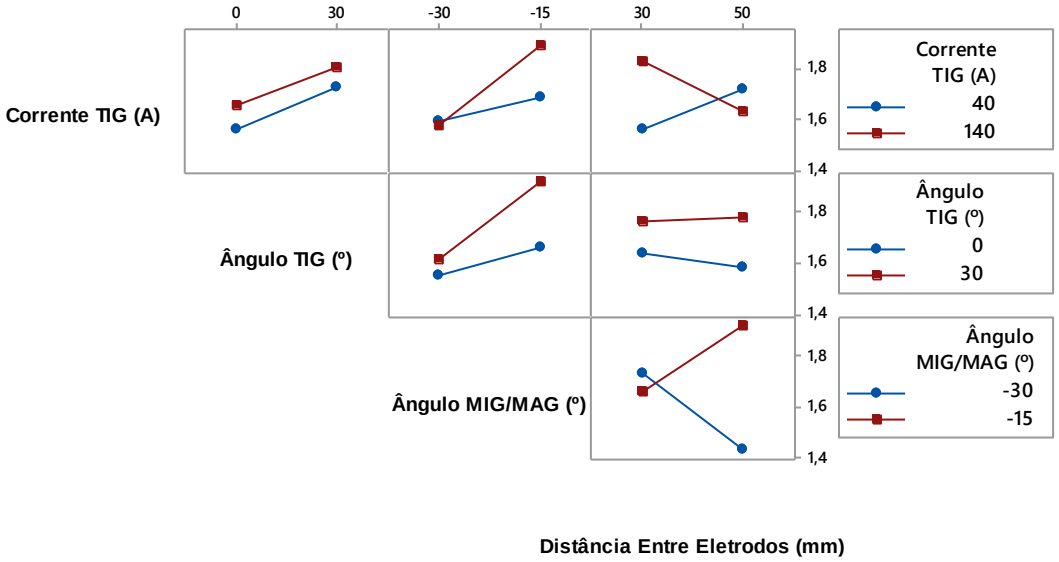
Fonte: (Autor)

Para Teixeira (2011), a distância entres os eletrodos não apresentou efeitos significativos para a penetração do cordão de solda do processo TIG e MIG/MAG. Já a corrente TIG, assim como a velocidade de alimentação de arame, a tensão MIG/ MAG, a

velocidade de soldagem, a interação entre a velocidade de alimentação do arame, a velocidade de soldagem, a interação entre a tensão MIG/MAG e a velocidade de soldagem, foram as que mais apresentaram efeitos significativos.

Entretanto, segundo o autor, a variável distância entre os eletrodos apresentou interações com outras duas variáveis tensões MAG e velocidade de alimentação do arame. Os gráficos de efeitos principais, mostrados na Figura 19, não identificam interações nas variáveis. Para tanto, são apresentados os gráficos da Figura 20, para visualizar as interações entre os fatores.

Figura 20 - Interação para penetração (mm)



Fonte: (Autor)

Na Figura 20, observa-se que o ângulo de posicionamento da tocha TIG, apresenta interação com a corrente TIG. No entanto, a distância entre os eletrodos apresenta interação considerável com o ângulo da tocha MIG/MAG e a corrente TIG.

O aumento da corrente, favorece o aumento da penetração. Quanto maior e mais intensa a corrente, maior será a pressão sobre a poça, contribuindo para uma maior penetração do cordão de solda. A formação do cordão de solda se deve a outro efeito além do térmico, trata-se do efeito mecânico. Dentro dos mecanismos desse efeito, a pressão do campo magnético destaca que quanto maior e mais concentrada a corrente, maior serão os campos magnéticos e a pressão sobre a poça, comportamento este, capaz de justificar uma maior área penetrada (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Teixeira (2011) cita que na soldagem convencional, a intensidade de corrente afeta diretamente a taxa de deposição, no modo de transferência, na penetração e no reforço do cordão de solda. Dessa forma, os resultados mostrados nos experimentos estão de acordo com o esperado quando se comparado com a soldagem convencional.

Kanemaru et al. (2012), acredita que para obter influência do valor da corrente elétrica TIG na penetração do cordão de solda é necessário que o valor dessa corrente elétrica seja maior que o valor da corrente elétrica MIG/MAG. No entanto, os resultados do presente trabalho mostraram que também é possível atuar sobre a geometria do cordão de solda com correntes TIG inferiores às correntes MIG/MAG.

O ângulo da tocha MIG/MAG apresenta interação com a corrente TIG e com a distância entre os eletrodos. Machado (1996), diz que o deslocamento da tocha influi na penetração do cordão de solda e que utilizar a tocha “empurrando”, causa redução na penetração, ao passo que “puxando”, aumenta a penetração. Como a configuração da tocha esteve “empurrando” durante a realização dos testes, por se tratar de um processo híbrido, essa variável pode ter sofrido interferência de outra variável.

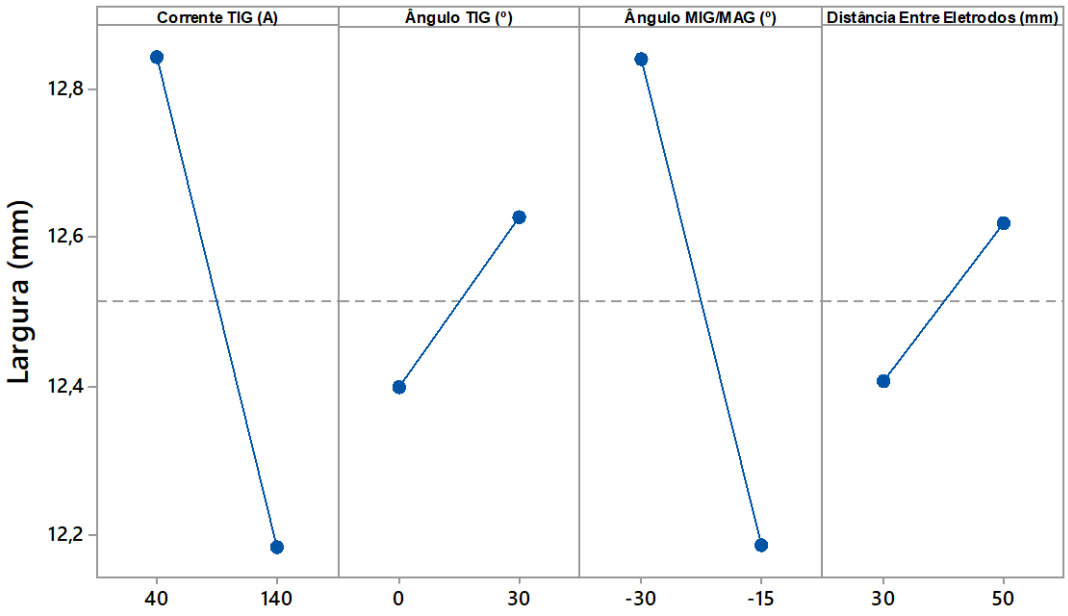
Por fim, a distância entre os eletrodos foi a variável que mais apresentou interação com as demais variáveis, principalmente com a corrente TIG. O valor mínimo da distância entre os eletrodos juntamente com o valor máximo da corrente TIG, apresentou os maiores valores de penetração. Acredita-se, que a quantidade de calor depositado na chapa é maior nessa configuração, pois quanto mais próximos os arcos se mantinham, maior a intensidade de corrente em uma mesma área e maior a penetração do cordão de solda.

4.2.4 Largura do Cordão de Solda

A Figura 21, mostra que as variáveis estudadas, apresentaram efeitos principais na largura do cordão de solda. Uma maior largura é obtida ao utilizar a corrente TIG e o ângulo da tocha MIG/MAG no valor mínimo e o restante das variáveis no valor máximo.

Teixeira (2011), em suas análises, avaliou o comportamento da corrente TIG e da distância entre os eletrodos na geometria do cordão de solda. Como resultado, essas duas variáveis não apresentaram efeitos significativos para a largura do cordão de solda para as condições experimentais adotadas pelo autor. No entanto, o autor identificou que as mesmas apresentaram interações com outras variáveis, a corrente TIG com a velocidade de alimentação MIG/MAG; e a distância entre os eletrodos com a velocidade de alimentação do arame e a tensão MIG/MAG.

Figura 21 - Gráfico efeitos principais para largura



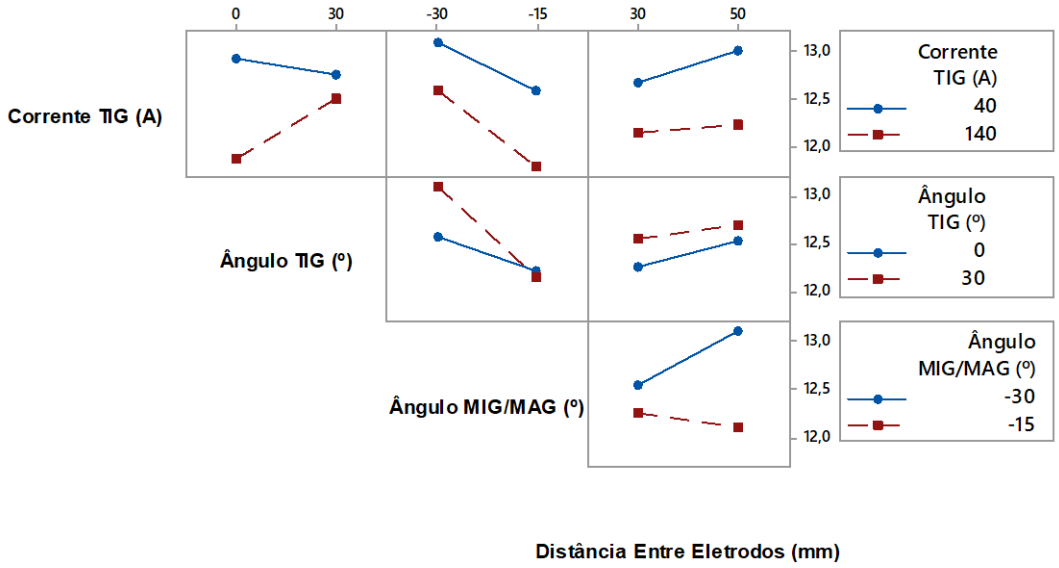
Fonte: (Autor)

Para Schneider (2014), a intensidade da corrente TIG está entre as variáveis de efeito significativo do processo TIG-MIG/MAG para a largura, juntamente com o gás de proteção MIG/MAG, a tensão MIG/MAG, a velocidade de soldagem e a vazão do gás de proteção TIG. Além dessas variáveis analisadas pelo autor, a distância entre os eletrodos e os ângulos de ataque das tochas TIG e MIG/MAG, são as variáveis que apresentam efeitos significativos para o parâmetro largura, do cordão de solda.

O gráfico de efeito principal, não apresenta as interações entre as variáveis, para isso, são apresentados os gráficos da Figura 22, a fim de visualizar as interações entre as variáveis.

Na Figura 22, são apresentados os gráficos de interação para a largura. Nele, pode ser observada uma interação mais pronunciada entre a corrente TIG e o ângulo da tocha TIG, entre os ângulos das tochas TIG e MIG/MAG e entre o ângulo MIG/MAG e a distância entre os eletrodos.

Figura 22 - Interação para largura (mm)



Fonte: (Autor)

Schneider et al. (2017) destaca que o conceito de processo de soldagem TIG convencional, para a corrente de soldagem que sugere que quanto maior a corrente TIG, maior será a largura do cordão de solda, não se aplica a esse processo. Neste caso, a maior corrente elétrica TIG, não necessariamente promove as maiores larguras, uma vez que outros parâmetros também afetam a largura.

Ainda conforme o autor, a largura do cordão de solda pode aumentar devido ao arco híbrido que tem uma maior área de contato com a peça, auxiliando assim, a obtenção de uma maior área aquecida, uma maior molhabilidadee maior largura do cordão de solda.

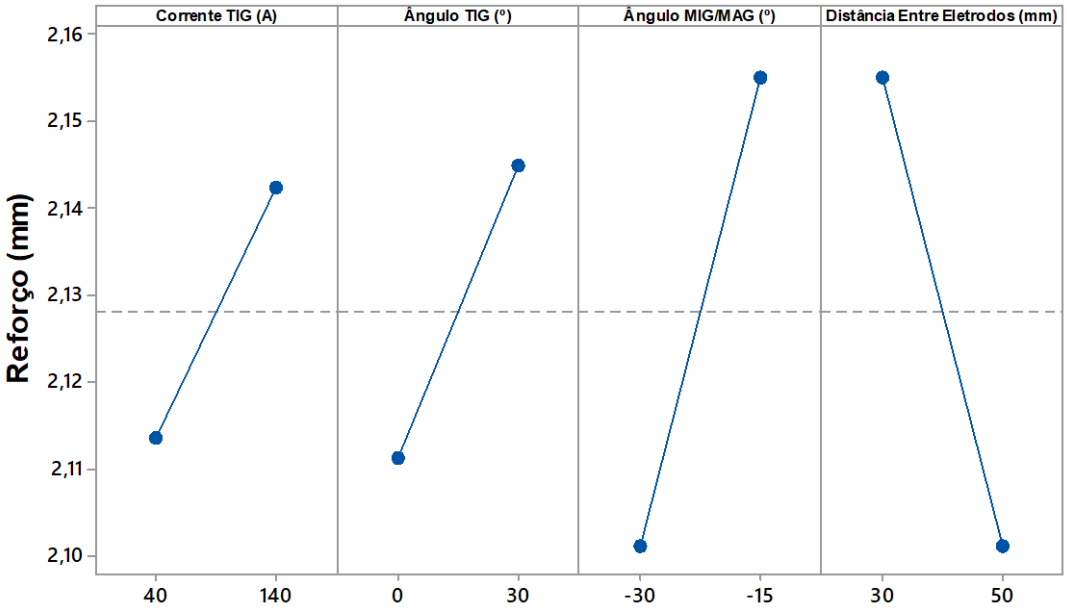
A princípio, era de se esperar que ao aumentar a corrente no arco TIG, em função do maior aquecimento da chapa e provavelmente uma maior molhabilidade da poça fundida em relação a chapa, aumentasse a largura do cordão de solda, assim como no processo convencional, no entanto, se observa que este ganho de aquecimento foi revertido em aumento da penetração.

4.2.5 Reforço do Cordão de Solda

A Figura 23, apresenta os principais efeitos avaliados para o reforço do cordão de solda. Todos os parâmetros avaliados possuem um efeito principal, afetando a resposta. Um

maior reforço é obtido ao utilizar, entre os valores avaliados, corrente, ângulo das tochas TIG e MIG/MAG nos valores máximos e distância entre eletrodos nos valores mínimos.

Figura 23- Gráfico efeitos principais para reforço



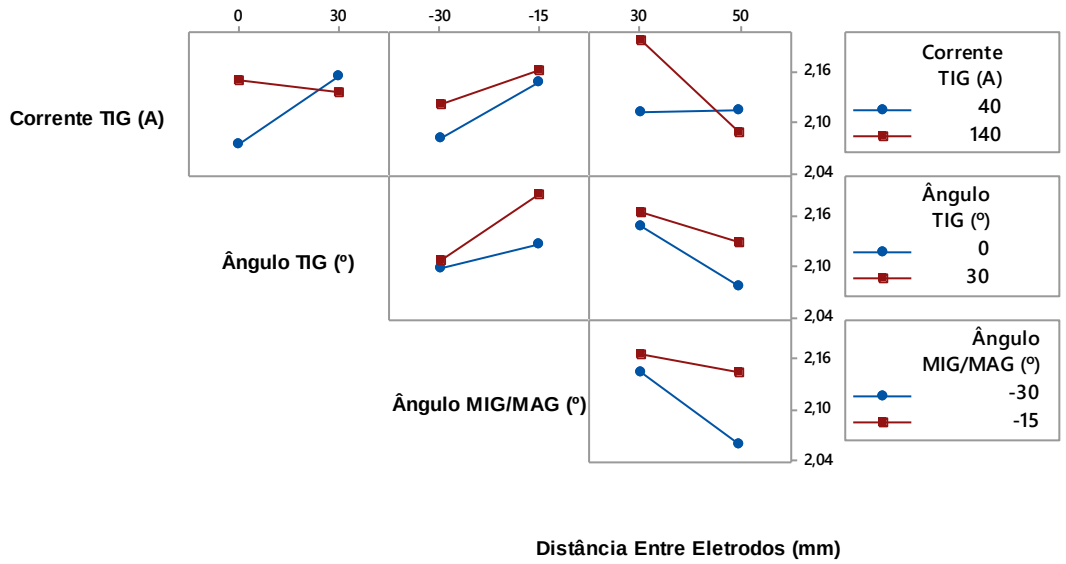
Fonte: (Autor)

A Figura 24, apresenta as interações entre as variáveis para o parâmetro reforço do cordão de solda. Na figura, pode ser observado que a distância entre os eletrodos teve maior interação com a corrente TIG, que por sua vez, também apresentou forte interação com o ângulo da tocha TIG. Para as demais variáveis, a intensidade da interação é menos pronunciada.

O reforço do cordão de solda é governado por outro parâmetro, sendo a largura do cordão de solda. Scotti e Ponomarev (2008), mencionam que para uma mesma energia de aporte e mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento, quanto maior se torna a largura, menor será o reforço.

Logo, operar no valor mínimo para a distância entre os eletrodos e o restante das variáveis no valor máximo, favorecerá para um cordão de solda com maiores reforços. Essa configuração se contradiz com o de maiores larguras, pois a mesma levará a um cordão de solda com menores larguras, condizendo com a afirmação de Scotti e Ponomarev (2008).

Figura 24 - Interação para reforço (mm)



Fonte: (Autor)

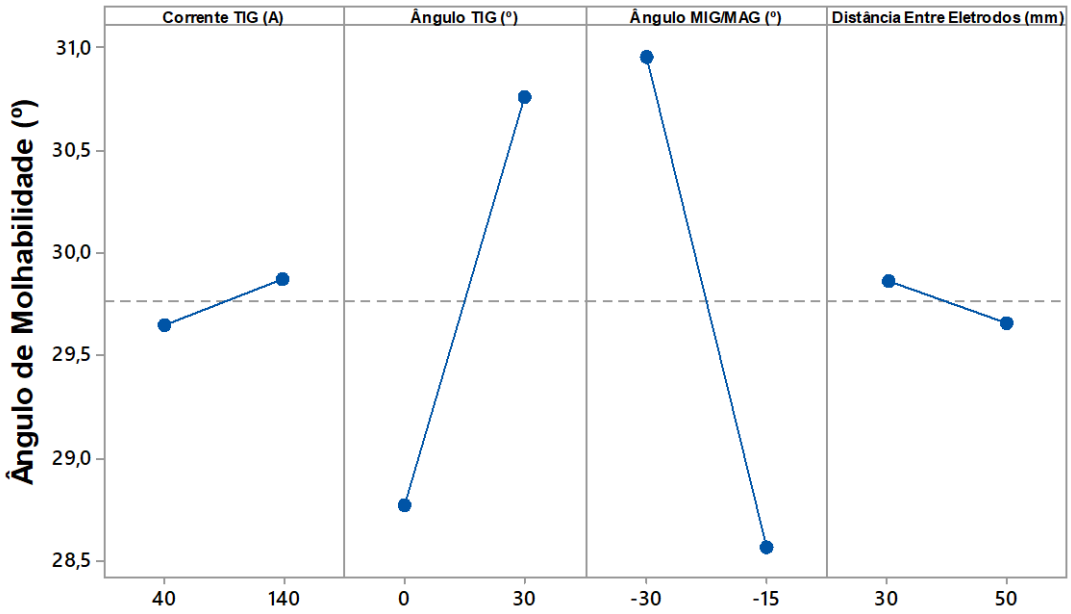
Schneider (2014), em suas analises, procurou obter um menor reforço possível do cordão de solda. Para o autor, a intensidade da corrente TIG está entre as principais variáveis significativas para o parâmetro, influenciando no sentido de o valor mínimo da corrente TIG gerar o menor reforço do cordão de solda e uma corrente TIG intermediária, gerar cordões de solda com maiores reforços. Dessa forma, os resultados para o reforço do cordão de solda, estão condizentes com a literatura.

4.2.6 Ângulo de convexidade

A Figura 25, apresenta os efeitos principais avaliados para o ângulo de convexidade. O valor deste ângulo foi medido entre as retas que tangenciam a superfície do cordão de solda, na região de encontro com a chapa de teste e a reta que tangencia a superfície das chapas, foi tomada uma medida em cada lado da seção transversal e considerado o valor médio.

Um maior ângulo de convexidade é obtido ao utilizar, entre os valores avaliados, o ângulo da tocha TIG no valor máximo e o ângulo da tocha MIG/MAG no valor mínimo. Para os efeitos principais, a corrente TIG e a distância entre os eletrodos apresentam pouca influência.

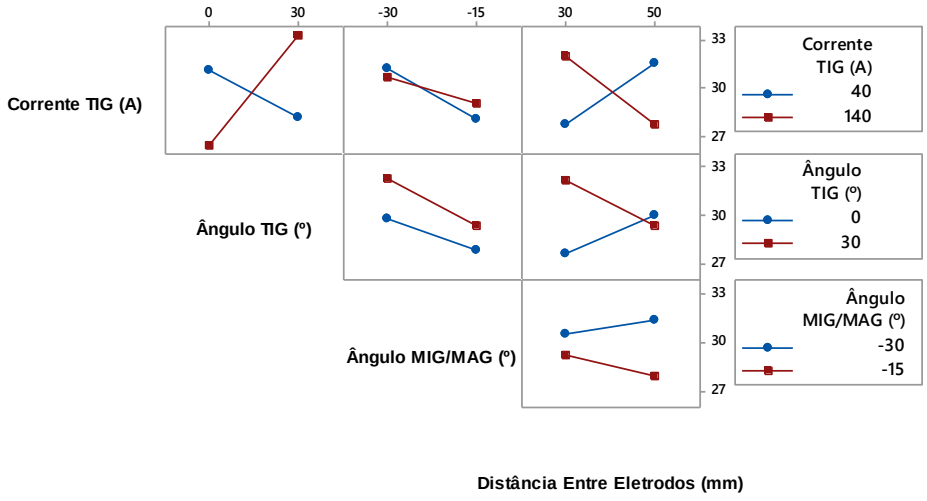
Figura 25 - Gráfico efeitos principais para ângulo de convexidade



Fonte: (Autor)

Na Figura 26, observa-se que a distância entre os eletrodos e a corrente TIG e ângulo da tocha TIG, juntamente com a corrente TIG e o ângulo da tocha TIG, apresentam as interações mais pronunciadas.

Figura 26 - Interação para ângulo de convexidade (°)



Fonte: (Autor)

O ângulo de convexidade do cordão de solda está diretamente ligado a temperatura na região da solda. Quanto mais quente for a lateral da junta, maior será a convexidade do metal de base. Acredita-se, que os valores máximos da corrente TIG e do ângulo da tocha TIG, juntamente com os valores mínimos da distância entre os eletrodos, implicará em uma maior intensidade de corrente, gerando maior calor ao metal de base e, consequentemente, aquecendo mais a lateral da junta, o que contribuirá para maiores ângulos de convexidade.

4.3 Considerações Finais

Para as condições experimentais deste capítulo possível concluir que:

- Sem alterar os parâmetros de velocidade de soldagem e velocidade de alimentação da parte MIG/MAG do processo, é possível atuar na geometria do cordão de solda através da variação dos parâmetros de posicionamento e da corrente no circuito TIG;

- Todos as variáveis avaliadas (Corrente TIG, ângulo da tocha TIG, ângulo da tocha MIG/MAG e a distância entre os eletrodos) afetam os parâmetros geométricos do cordão de solda (largura, reforço, área fundida, penetração e ângulo de convexidade);

- As variáveis analisadas possuem efeitos principais sobre os parâmetros medidos (com diferentes intensidades). Para todos os parâmetros analisados, alguma interação entre as variáveis foi identificada;

- Uma maior área fundida e penetração é alcançada com a corrente TIG, o ângulo da tocha TIG e o ângulo da tocha MIG/MAG nos valores máximos e a distância entre os eletrodos no valor mínimo.

- A maior largura é obtida ao utilizar a corrente TIG e o ângulo da tocha MIG/MAG nos valores mínimos e distância entre eletrodos e ângulo da tocha TIG nos valores máximos.

- O maior reforço é obtido ao utilizar a corrente TIG, ângulo da tocha TIG e o ângulo da tocha MIG/MAG nos valores máximos e a distância entre eletrodos no valor mínimo.

- E, por fim, um maior ângulo de convexidade foi conseguido ao utilizar corrente TIG e ângulos das tochas nos valores máximos e distância entre eletrodos no valor mínimo.

CAPITULO V

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DA TOCHA TIG E DA DISTÂNCIA ENTRE OS ELETRODOS TIG E MIG/MAG SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Os resultados do Capítulo anterior, mostram que as variáveis de posicionamento avaliadas, possuem influência sobre a geometria do cordão de solda. Neste sentido, este capítulo objetiva aprofundar o entendimento sobre dois desses parâmetros, o ângulo da tocha TIG e a distância entre os eletrodos. Optou-se por não avaliar o ângulo da tocha MIG/MAG neste estudo, por já existirem pesquisas sobre o mesmo, para o processo convencional.

Os resultados do capítulo IV, fazem acreditar que o ângulo da tocha TIG tem muito a contribuir na geometria do cordão de solda, pois apresenta efeito principal para todos os parâmetros avaliados e um número relevante de interações com as outras variáveis. O mesmo acontece com a distância entre os eletrodos, levando a considerar que, com um melhor entendimento dessas variáveis, será possível atuar na geometria do cordão de solda. Assim, nesse capítulo, é apresentado os efeitos da variação desses dois parâmetros sobre a geometria do cordão de solda por meio da metodologia da superfície de resposta.

5.1 Planejamento dos Experimentos

Optou-se pelo Planejamento Composto Central (PCC ou CCD – do inglês *Central Composite Design*), o qual é o mais utilizado dos planejamentos de segunda ordem. Este planejamento é bastante utilizado para o ajuste de superfície de resposta de segunda ordem, sendo o mesmo representado pelo polinômio da Equação 1 (SOUZA et al., 2013).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i \\ i<j}} \sum_{j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad \text{(Equação 1)}$$

Os delineamentos compostos centrais, permitem, para um número determinado de fatores, escolher entre várias alternativas, a que mais lhe convém. Dependendo do valor escolhido é possível obter ortogonalidade, rotacionalidade ou ambas. A ortogonalidade propicia a estimação independente para os coeficientes do modelo e a rotacionalidade proporciona variâncias idênticas para pontos situados a mesma distância do centro em qualquer direção (CONAGIN, 1982).

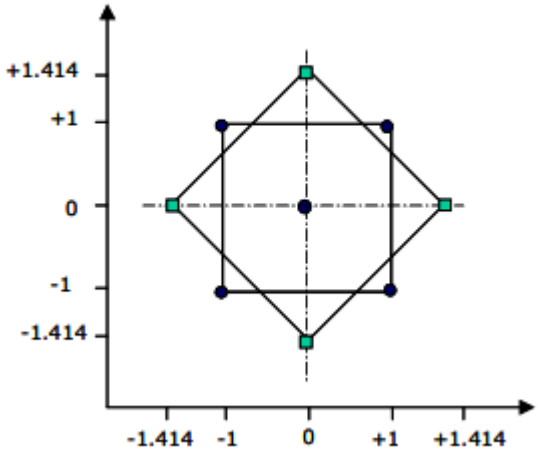
Os 2k pontos axiais, são localizados em ($\pm\propto_1$, 0, 0, ..., 0), (0, $\pm\propto_1$, 0, ..., 0), (0, 0, $\pm\propto_1$, ..., 0), (0, 0, 0, ..., $\pm\propto_1$), sendo que $\pm\propto_1$é dado pela equação 2 (GÁLDAMEZ, 2002).

$\propto_1 = (\ 2^k)$ ¼ (Equação 2)

O ponto axial no planejamento é utilizado para garantir que o experimento seja rotável. Segundo Montgomery (1991) e Box e Draper (1987), com esse ponto é possível estimar os coeficientes da superfície em todas as direções possíveis. Gáldamez (2002), exemplifica a configuração de um experimento fatorial composto central com dois fatores, sendo que o quadrado com círculos sólidos nas arestas, representa o fatorial 2², o círculo no centro representa o ponto central n_c (0,0), (0,0), ..., (0,0) e o losango com quadrados nas arestas mostra os pontos axiais do experimento fatorial composto central. A Figura 27, ilustra a representação gráfica do planejamento composto central.

A metodologia da superfície de resposta, ou MSR é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise nas aplicações em que a resposta de interesse seja influenciada por muitas variáveis e o objetivo seja otimizar a resposta. O objetivo futuro da MSR é determinar as condições de operação ótimas para o sistema ou determinar uma região do espaço fatorial, em que as especificações operacionais sejam satisfeitas (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

Figura 27 - Representação gráfica do planejamento composto central



Fonte: (Adaptado, Montgomery (1991))

5.1.2 Condições de realização dos testes.

Abaixo, serão descritas as condições de operacionalidade de cada variável durante a realização dos testes:

- X1= Ângulo da tocha TIG (º) (puxando - *positiva*; empurrando e reta);
- X2= Distância entre os eletrodos (mm).

Os mesmos valores que foram utilizados para as variáveis que se mantiveram fixas nos testes do capítulo IV, foram utilizadas na realização de novos experimentos. A diferença, é que as variáveis ângulo da tocha MIG/MAG e corrente TIG, também se mantiveram fixas e foram adotados os seguintes valores:

- Ângulo da tocha MIG/MAG de -15 (º) empurrando, estabeleceu o valor mais próximo da tocha reta;
- Corrente TIG 140 (A). Esta condição se mostrou mais estável durante os testes;
- Tensão MIG/MAG de 31 (V);
- Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP) de 20 (mm);
- Velocidade de Alimentação Arame de 6 (m/min);
- Distância da ponta do Eletrodo TIG à Peça de Soldagem de 2 (mm);
- Velocidade de Soldagem de 38 (cm/min);
- Ângulo de afiação do Eletrodo de 60 (º).

A Tabela 10 exibe as condições de ajustadas para cada teste.

Tabela 10 – Ajuste das condições de soldagem

Teste	**Sequência aleatória de soldagem**	**Valor ajustado do ângulo da tocha TIG (nível)**	**Valor ajustado da distância entre os eletrodos (nível)**
1	5	30º (-1)	30 mm (-1)
2	6	30º (-1)	50 mm (1)
3	8	0º (1)	30 mm (-1)
4	10	0º (1)	50 mm (1)
5	1	15º (0)	40 mm (0)
6	3	15º (0)	40 mm (0)
7	9	36,15º (√2)	40 mm (0)
8	12	-6,15º (-√2)	40 mm (0)
9	13	15º (0)	54,1 mm (√2)
10	4	15º (0)	25,9 mm (-√2)

Fonte: (Autor).

5.2 Resultados e Discussões

Na tabela 11, são apresentados os valores monitorados de corrente e tensão para cada teste.

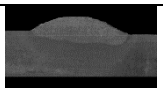
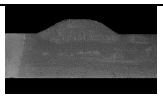
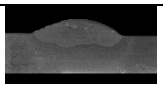
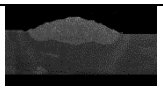
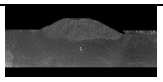
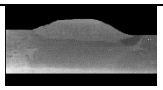
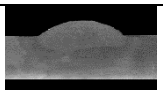
Tabela 11 – Valores monitorados dos sinais de corrente e tensão

Testes	**Sequência Aleatória de soldagem**	**Corrente TIG (A)**	**Tensão TIG (V)**	**Corrente MIG/MAG (A)**	**Tensão MIG/MAG (V)**
1	5	142,45	10,17	214,11	30,62
2	6	142,97	10,16	212,84	30,41
3	8	142,09	9,39	205,68	30,39
4	10	142,74	10,34	208,96	30,46
6	1	141,24	13,08	188,89	30,51
7	3	148,36	8,60	199,32	30,42
8	9	142,60	10,63	211,39	30,41
9	12	142,08	10,17	211,39	30,45
10	13	142,66	12,87	197,45	30,13
11	4	142,55	10,19	212,61	30,53

Fonte: (Autor).

A Tabela 12, apresenta os valores médios das medições dos parâmetros, no qual: R = Reforço, P = Penetração, L= Largura, AD = Área depositada, AF = Área fundida do cordão de solda e A = Ângulo de convexidade do cordão de Solda.

Tabela 12 – Resultados das medições dos parâmetros geométricos dos cordões de solda

Testes	Fotos das seções	AF (mm²)	AD (mm²)	P (mm)	R(mm)	A (º)	L (mm)
1		$17,24^{\pm1,54}$	$16,00^{\pm0,04}$	$1,53^{\pm0,03}$	$2,20^{\pm0,01}$	$33,39^{\pm0,16}$	$11,75^{\pm0,17}$
2		$14,60^{\pm0,15}$	$15,69^{\pm0,28}$	$1,40^{\pm0,05}$	$1,95^{\pm0,02}$	$31,85^{\pm0,01}$	$11,99^{\pm0,04}$
3		$15,73^{\pm0,18}$	$17,59^{\pm1,91}$	$1,97^{\pm0,02}$	$2,11^{\pm0,00}$	$27,035^{\pm0,35}$	$12,77^{\pm0,09}$
4		$16,85^{\pm1,34}$	$16,24^{\pm0,19}$	$1,52^{\pm0,02}$	$1,87^{\pm0,01}$	$26,51^{\pm0,22}$	$12,95^{\pm0,00}$
5		$15,45^{\pm0,69}$	$16,40^{\pm1,00}$	$1,51^{\pm0,01}$	$2,04^{\pm0,02}$	$26,43^{\pm0,00}$	$12,37^{\pm0,32}$
6		$16,57^{\pm0,13}$	$16,89^{\pm0,43}$	$1,56^{\pm0,02}$	$2,14^{\pm0,15}$	$31,54^{\pm0,24}$	$12,33^{\pm0,05}$
7		$17,07^{\pm0,80}$	$16,01^{\pm2,80}$	$1,61^{\pm0,01}$	$2,06^{\pm0,25}$	$32,84^{\pm0,24}$	$12,44^{\pm0,05}$
8		$17,99^{\pm0,26}$	$16,15^{\pm2,74}$	$1,62^{\pm0,10}$	$2,02^{\pm0,45}$	$27,345^{\pm0,33}$	$12,58^{\pm0,06}$
9		$16,73^{\pm0,44}$	$17,57^{\pm0,04}$	$1,51^{\pm0,03}$	$1,97^{\pm0,05}$	$30,72^{\pm0,71}$	$12,55^{\pm0,10}$
10		$21,08^{\pm0,12}$	$17,40^{\pm1,06}$	$1,90^{\pm0,02}$	$2,10^{\pm0,02}$	$28,96^{\pm4,12}$	$12,43^{\pm0,06}$

Fonte: (Autor).

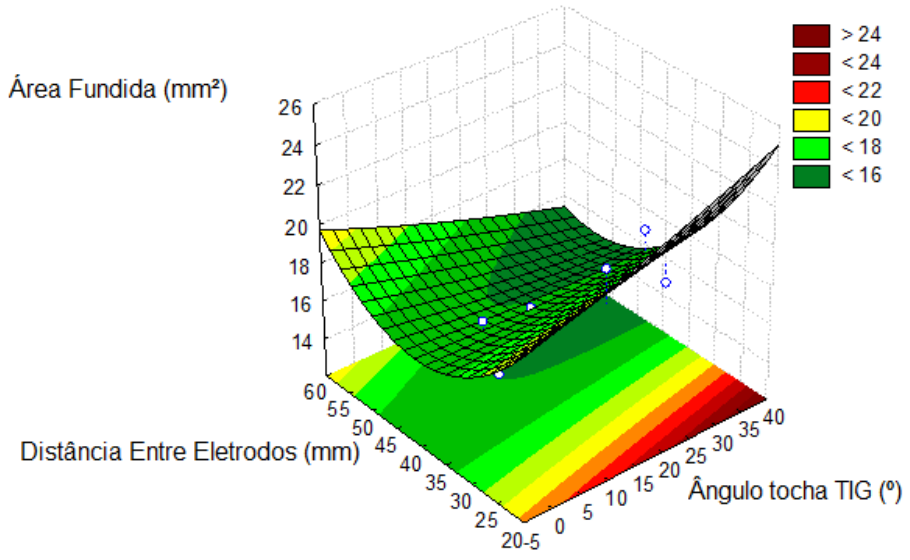
Na sequência, serão apresentados os gráficos de superfície de resposta construídos a partir dos resultados obtidos. Os gráficos demonstram que a partir da configuração do ângulo da tocha TIG e da configuração da distância do eletrodo ao arame é possível se controlar os parâmetros para determinado processo.

5.2.1 Análise da Área Fundida do Cordão de Solda

A Figura 28, mostra a superfície de resposta da relação entre as variáveis distância entre os eletrodos e ângulo da tocha TIG, sobre a área fundida do cordão de solda. Todos os

parâmetros avaliados possuem um efeito principal, afetando a resposta, uma vez que, alterar os valores das variáveis modificaria o resultado final. Então, é possível obter cordões de solda com maiores áreas penetradas ou menores, a partir da configuração das variáveis distância entre os eletrodos e ângulo da tocha TIG.

Figura 28 – Superfície de resposta da área fundida do cordão de solda em relação da tocha TIG e distância entre os eletrodos



Fonte: (Autor)

Em relação a área fundida, a Figura 28 aponta que as mudanças nas variáveis avaliadas, afetam a resposta, e quanto maior a inclinação da curva, maior são os valores de classificação para as variáveis. Uma maior área fundida é obtida ao utilizar, entre os valores avaliados, a distância entre os eletrodos no valor mínimo e o ângulo da tocha TIG no valor máximo.

Possivelmente, ao aumentar o ângulo da tocha TIG, o calor do arco é direcionado para a área de formação da poça, contribuindo com o aquecimento da região e o aumento da área fundida do metal de base, juntamente com a interação da menor distância entre os eletrodos, o que diminui o tempo para o calor proveniente do arco TIG se dissipar pela chapa, contribuindo assim, para uma maior área fundida.

Teixeira (2011), valida que os fatores significativos para a área do cordão de solda, são a velocidade de alimentação de arame, a tensão MIG/MAG e a velocidade de soldagem. Além dessas variáveis, avaliados pelo autor; acredita-se que a distância entre os eletrodos e o ângulo da tocha TIG, estejam entre as variáveis que afetam a resposta da área do cordão

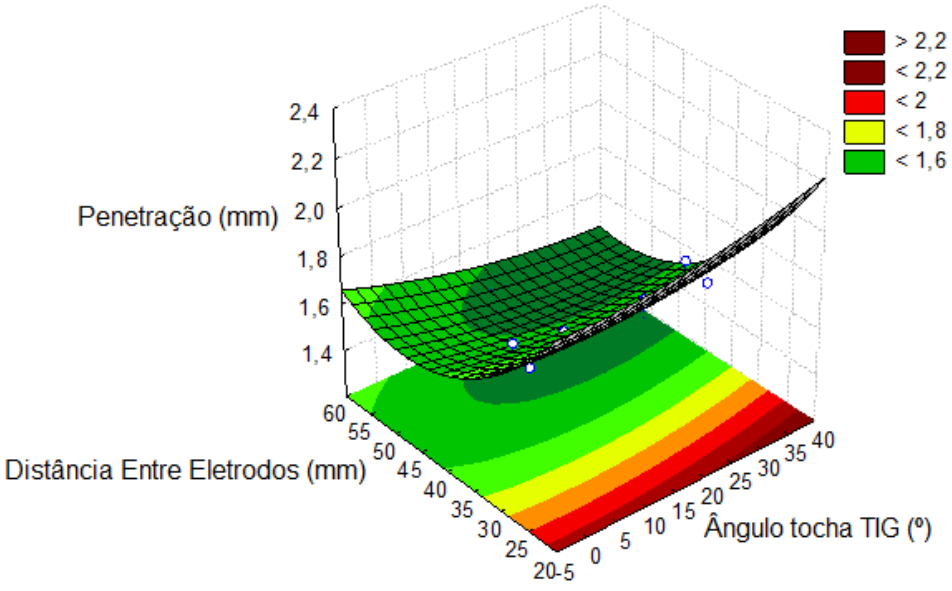
de solda, visto que, alterar os valores dessas variáveis, altera o valor final do parâmetro área fundida.

5.2.2 Análise da Penetração do Cordão de Solda.

A Figura 29, apresenta a superfície de resposta da penetração do cordão de solda em relação da distância entre os eletrodos e o ângulo da tocha TIG. Os maiores valores obtidos para a penetração do cordão de solda, estão na região com os menores valores de distância entres os eletrodos e maiores valores de ângulo da tocha TIG. Já os menores valores encontrados para a penetração, correspondem aos maiores valores de distância entre os eletrodos e maiores ângulos da tocha TIG.

A combinação de maior ângulo da tocha TIG e menor distancia entre as tochas, geometricamente, contribui para direcionar o arco para a região de formação do cordão de solda que se forma pelo processo MIG/MAG. Assim, o calor naquela região aumenta, o que contribui na formação de um cordão de solda com maior penetração.

Figura 29 - Superfície de resposta da penetração do cordão de solda em relação da tocha TIG e distância entre os eletrodos



Fonte: (Autor)

No processo de soldagem TIG-MIG/MAG analisado por Teixeira (2011), a distância entre os eletrodos não apresentou influências significativas sobre a penetração, visto que, para o autor, as únicas variáveis significativas para esta resposta, foram a velocidade de alimentação de arame, a tensão MIG/MAG, a corrente TIG, a velocidade de soldagem, a interação entre a velocidade de alimentação do arame, a velocidade de soldagem, a interação entre a tensão MIG/MAG e a velocidade de soldagem. Porém, apesar da influência não ser significativa, esta variável apresentou interação com a velocidade de alimentação do arame e a tensão MIG/MAG.

Acredita-se que, além dessas duas variáveis apresentadas pelo autor, o ângulo da tocha TIG seja mais uma variável que apresenta interação com a distância entre os eletrodos.

Já para Kanemaru et al. (2012), o qual desenvolveu um estudo sobre a tocha ideal para o processo TIG-MIG/MAG, obteve uma variação de 1,5 mm de penetração, variando o ângulo da tocha TIG e MIG/MAG, na qual a maior penetração foi obtida na configuração TIG 0º e MIG/MAG 30º.

Mishima et al. (2013), também analisou os ângulos das tochas TIG e MIG/MAG para o processo TIG-MIG/MAG. Segundo os autores, a medida em que o ângulo da tocha TIG aumenta, há um aumento na corrente entre os eletrodos, mesmo com o aumento da distância entre cada ponta do eletrodo. Essa configuração, gera mais calor na peça a ser soldada, influenciando os parâmetros geométricos do cordão de solda.

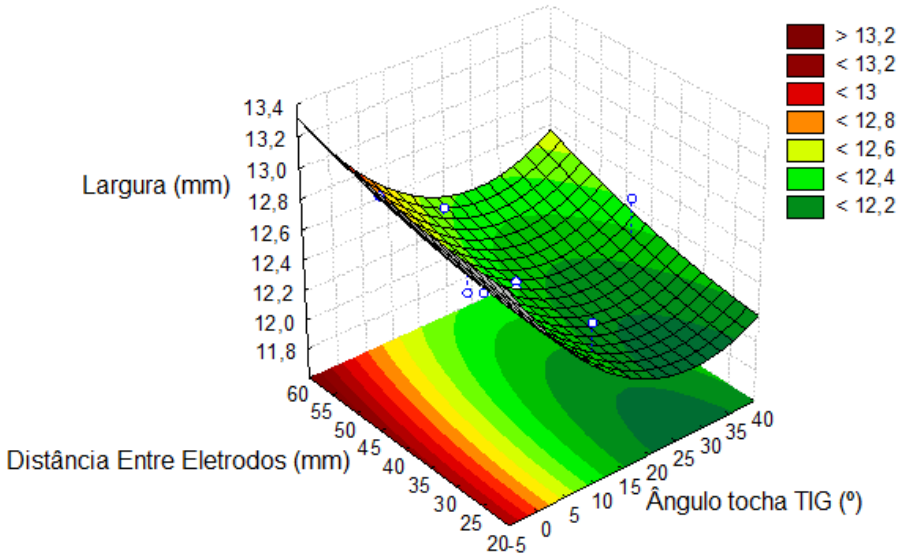
5.2.3 Análise da Largura e Reforço do Cordão de Solda

A Figura 30, apresenta a superfície de resposta da relação entre as variáveis distância entre os eletrodos e ângulo da tocha TIG sobre a largura do cordão de solda. Observa-se que cordões de solda com maiores larguras, são obtidos com as maiores distâncias entre os eletrodos e a tocha TIG na posição “normal”. Os menores valores de largura são obtidos com as menores distâncias entre eletrodos para um ângulo da tocha TIG de aproximadamente 30º.

Aumentar a distância entres os eletrodos, com a tocha TIG na posição “normal”, permite que o calor proveniente do arco TIG tenha mais tempo para se dissipar pela chapa, colaborando para um cordão de solda com maiores larguras.

Segundo Teixeira (2011), os fatores significativos na largura do cordão de solda, são a tensão MIG/MAG e a velocidade de soldagem. Entretanto, através dos resultados obtidos, acredita-se que a largura do cordão de solda, pode ser também comandada por variáveis físicas do processo, como a distância entre os eletrodos e o ângulo da tocha TIG.

Figura 30 - Superfície de resposta da largura do cordão de solda em relação da tocha TIG e distância entre os eletrodos



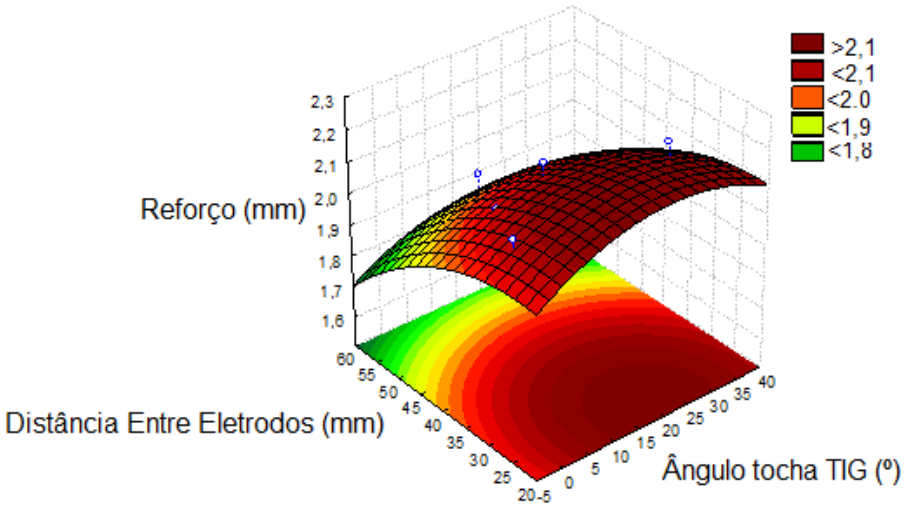
Fonte: (Autor)

Kanemaru et al. (2012 e 2013), realizou um estudo no qual as análises mostraram que, aumentar a distância entre os eletrodos, torna o arco elétrico instável. A variação dos ângulos entre as tochas de soldagem, não apresentaram uma variação significativa na geometria do cordão de solda (na largura e reforço). Porém, seu objetivo era criar uma tocha ideal para o processo TIG-MIG/MAG para aplicação prática, o que se diferencia se tratando da relação entre essas duas variáveis sobre a geometria do cordão de solda.

A Figura 31, apresenta a superfície de resposta do reforço do cordão de solda, em relação ao ângulo da tocha TIG e a distância entre os eletrodos. Os maiores reforços, são obtidos para ângulo da tocha TIG entre 20 e 25º “puxando” e mínima distância entre os eletrodos. Os menores reforços são obtidos para as maiores distâncias entre os eletrodos e a tocha TIG na posição “normal”.

Scotti e Ponomarev (2008) citam que, a largura do cordão de solda, governa outros dois parâmetros geométricos, o reforço que é a altura do material acima da superfície do metal base e a área penetrada. Quanto maior a largura do cordão de solda, menor será o reforço por melhorar a transferência de calor na chapa. Essa afirmação, apesar de ser de um processo convencional, está condizente com os resultados obtidos para o processo TIG-MIG/MAG, pois a configuração que produz cordões com maiores larguras, produz também menores reforços.

Figura 31 – Superfície de resposta para o reforço do cordão de solda em relação ao ângulo da tocha TIG e da distância entre os eletrodos



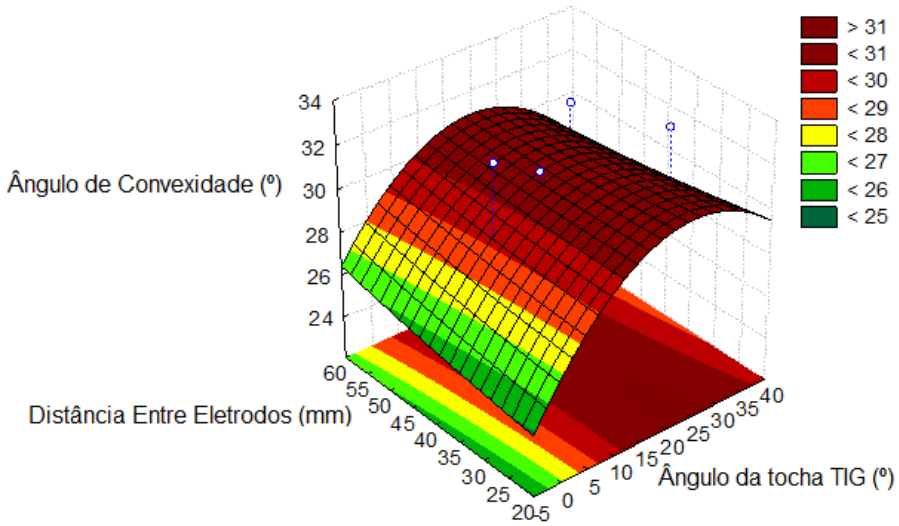
Fonte: (Autor)

Kanemaru et al. (2012 e 2013) realizaram a análise do reforço do cordão de solda, na qual não houve diferença significativa. A forma mais achatada do cordão de solda ou o menor reforço obtido, foi na configuração ângulo da tocha TIG 0º e ângulo da tocha MIG/MAG 45º, sendo também a configuração que obteve maior largura do cordão de solda.

5.2.4 Análise do Ângulo de Convexidade do Cordão de Solda

O gráfico da Figura 32, apresenta a superfície de resposta do ângulo de convexidade em relação da tocha TIG e a distância entre os eletrodos. Soldas com ângulo de convexidade maior, são obtidas para ângulos de tocha TIG de aproximadamente 25º e valores menores de convexidade, são obtidos para a tocha TIG na posição “normal”.

Figura 32 – Superfície de resposta para o ângulo de convexidade do cordão de solda em relação ao ângulo da tocha TIG e da distância entre os eletrodos



Fonte: (Autor)

5.3 Considerações Finais

Para as condições experimentais deste trabalho é possível concluir que:

- Sem alterar os parâmetros de velocidade de soldagem e velocidade de alimentação da parte MIG/MAG do processo é possível atuar na geometria do cordão de solda através da variação dos parâmetros de posicionamento;

- Todos as variáveis avaliadas (ângulo da tocha TIG e distância entre os eletrodos) afetam os parâmetros geométricos do cordão de solda (largura, reforço, área fundida, penetração e ângulo de convexidade);

- Uma maior área fundida e penetração é alcançada com o ângulo da tocha TIG no valor máximo e a distância entre os eletrodos no valor mínimo;

- A maior largura é obtida ao utilizar a distância entre eletrodos no valor máximo e o ângulo da tocha TIG nos valores mínimos;

- O maior reforço é obtido ao utilizar o ângulo da tocha TIG entre 20 e 25º “puxando” e a distância entre eletrodos no valor mínimo;

- E, por fim, um maior ângulo de convexidade foi conseguido, ao utilizar ângulo da tocha TIG em aproximadamente 25º “puxando”.

CAPITULO VI

INFLUÊNCIA DAS CORRENTES DE SOLDAGEM DO PROCESSO TIG-MIG/MAG SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Este capítulo tem como propósito avaliar a influência da corrente MIG/MAG e TIG no processo TIG-MIG/MAG, a fim de entender o comportamento dessas variáveis na geometria do cordão de solda.

6.1 Planejamento dos Experimentos

Para melhor entender o comportamento das correntes do processo TIG-MIG/MAG na geometria do cordão de solda, foram realizados testes com os valores da corrente TIG e MIG/MAG variando. Os parâmetros de posicionamento, avaliados no capítulo 5, foram fixados em 0º, -15º(empurrando) e 40 mm, respectivamente para o ângulo da tocha TIG, ângulo da tocha MIG e distância entre os eletrodos. Estes e os demais parâmetros fixos (foram mantidos os mesmos utilizados nos outros capítulos) estão listados na sequência:

- Ângulo da tocha TIG 0º;
- Distância entre os eletrodos de 40 mm;
- Ângulo da tocha MIG/MAG de -15 (º) empurrando;
- Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP) de 20 (mm);
- Distância da ponta do Eletrodo TIG à Peça de Soldagem de 2 (mm);
- Ângulo de afiação da ponta do Eletrodo de 60 (º).

Como a fonte operou em modo tensão constante, para obter os valores de corrente desejados (220, 250 e 280 A), foram ajustados os valores de tensão de referência e

velocidade de alimentação. A tensão MIG/MAG utilizada, foi a mínima que garantisse uma soldagem sem curtos circuitos (não é transferência por curto circuito). Para garantir a comparação, a relação entre a velocidade de soldagem e velocidade de alimentação, foi mantida em todos os testes comparativos. Na Tabela 13, são apresentados os parâmetros utilizados como entrada na fonte MIG/MAG (velocidade de soldagem, velocidade de alimentação e tensão) que resultaram nos valores desejados de corrente.

Tabela 13 - Parâmetros que variaram

Corrente MIG/MAG – Saída	**220 A**	**250 A**	**280 A**
Velocidade de Soldagem (cm/min)	38,0	44,3	50,7
Velocidade de Alimentação (m/min)	6,0	7,0	8,0
Tensão MIG/MAG (V)	31,0	31,5	33,0

Fonte: (Autor).

Finalmente, a Tabela 14, apresenta a combinação entre os três valores de corrente MIG/MAG (220, 250 e 280 A) com os três valores de corrente TIG (0, 40 e 140 A). A condição de soldagem com corrente TIG de 0 A corresponde ao processo MIG/MAG convencional.

Tabela 14 - Ajuste das condições de soldagem

Testes	Corrente MIG/MAG (A)	Corrente TIG (A)
1	220	0
2	250	0
3	280	0
4	220	40
5	220	140
6	250	40
7	250	140
8	280	40
9	280	140

Fonte: (Autor).

Adotou-se como resposta de saída, os mesmos parâmetros analisados no capitulo IV e V, sendo eles: área fundida no metal de base, largura, reforço, penetração e ângulo de convexidade.

6.2 Resultados e Discussões

A Tabela 15, apresenta os valores médios monitorados dos sinais de corrente e tensão para cada teste.

Tabela 15 – Valores reais de corrente e tensão

Testes	Corrente TIG (A)	Tensão TIG (V)	Corrente MIG/MAG (A)	Tensão MIG/MAG (V)
1	0	0	229,31	31,27
2	0	0	257,40	31,86
3	0	0	277,80	33,29
4	42,01	12,54	238,55	31,22
5	130,12	13,40	238,03	31,22
6	42,69	11,45	258,30	31,75
7	130,39	14,92	242,14	32,12
8	37,70	10,53	283,70	33,26
9	130,66	14,32	279,34	33,24

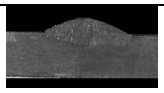
Fonte: (Autor).

A Tabela 16, apresenta os resultados das medições dos parâmetros no qual: R = Reforço, P = Penetração, L= Largura, AD = Área depositada, AF = Área fundida do cordão de solda e A = Ângulo de convexidade do cordão de Solda.

Foram realizados testes com o processo MIG/MAG convencional (corrente TIG em 0 A) e com o processo TIG-MIG/MAG, a fim de comparar e entender melhor o comportamento das correntes no processo TIG-MIG/MAG. Na sequência, para uma melhor visualização,

serão apresentados os gráficos construídos a partir dos resultados obtidos. O gráfico de linha utilizado, serve para comparar os padrões de resposta de uma função ou de uma série.

Tabela 16 – Resultados das medições dos parâmetros geométricos dos cordões de solda

Testes	Fotos das seções	AF (mm²)	AD (mm²)	P (mm)	R(mm)	A (º)	L (mm)
1		$15,73^{\pm0,07}$	$16,22^{\pm0,08}$	$1,59^{\pm0,04}$	$2,24^{\pm0,07}$	$30,59^{\pm0,00}$	$11,32^{\pm0,05}$
2		$15,48^{\pm0,22}$	$17,46^{\pm0,23}$	$1,50^{\pm0,08}$	$2,02^{\pm0,13}$	$31,54^{\pm0,24}$	$11,90^{\pm0,52}$
3		$19,40^{\pm0,68}$	$16,23^{\pm0,10}$	$1,93^{\pm0,07}$	$2,23^{\pm0,10}$	$32,84^{\pm0,24}$	$11,42^{\pm0,09}$
4		$21,02^{\pm0,55}$	$16,74^{\pm0,33}$	$2,00^{\pm0,04}$	$1,99^{\pm0,02}$	$27,345^{\pm0,33}$	$12,42^{\pm0,30}$
5		$22,80^{\pm0,07}$	$18,23^{\pm0,32}$	$2,10^{\pm0,12}$	$2,10^{\pm0,02}$	$33,39^{\pm0,16}$	$12,19^{\pm0,12}$
6		$18,80^{\pm0,15}$	$16,56^{\pm0,31}$	$1,70^{\pm0,04}$	$2,01^{\pm0,02}$	$31,85^{\pm0,01}$	$12,22^{\pm0,51}$
7		$16,89^{\pm0,48}$	$17,46^{\pm0,20}$	$1,59^{\pm0,12}$	$1,97^{\pm0,07}$	$27,035^{\pm0,35}$	$12,49^{\pm0,35}$
8		$19,12^{\pm0,13}$	$16,22^{\pm0,02}$	$1,86^{\pm0,09}$	$2,11^{\pm0,04}$	$30,72^{\pm0,71}$	$12,08^{\pm0,02}$
9		$21,09^{\pm0,24}$	$16,15^{\pm0,04}$	$1,95^{\pm0,02}$	$2,16^{\pm0,02}$	$28,96^{\pm4,12}$	$12,00^{\pm0,04}$

Fonte: (Autor).

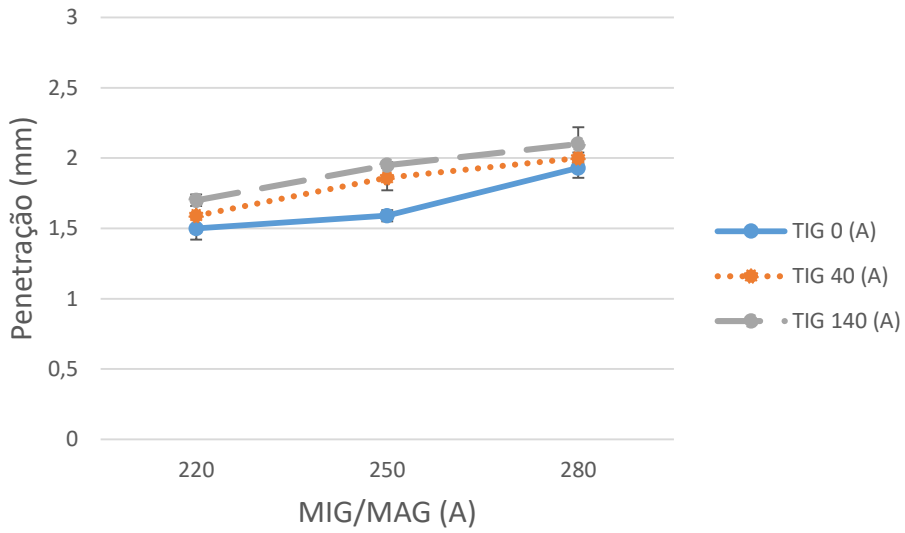
6.2.1 Análise da penetração do cordão de solda

Na Figura 33, é apresentado o gráfico de interação das correntes TIG e MIG/MAG sobre a penetração do cordão de solda no processo TIG-MIG/MAG

Analisando o gráfico é possível identificar uma tendência em aumentar a penetração, ao aumentar a corrente MIG/MAG, a qual foi atribuída por Resende et al. (2009), ao possível

aumento da pressão exercida pelo arco, devido a maior concentração dos campos magnéticos. Também foi observado por Scotti e Rodrigues (2009), que maiores correntes resultam em gotas com maiores velocidades, podendo contribuir para maiores penetrações.

Figura 33 - Penetração do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG



Fonte: (Autor)

Também é possível observar, que ao inserir corrente no circuito TIG, são obtidos incrementos nos valores da penetração em relação ao processo MIG/MAG convencional. Esse incremento a contribuição que o arco TIG exerce no processo de aquecimento da chapa, e o seu efeito, é tanto maior, quanto maior a corrente. Portanto, o efeito foi similar para os três níveis de corrente MIG/MAG avaliados.

Kanemaru et al. (2013) avaliou valores da corrente TIG na faixa de 150 a 500 A e MIG/MAG em 270 A. Segundo o autor, um arco estável foi gerado na faixa de corrente TIG de 250 a 500 A, ou seja, na faixa em que a corrente TIG era maior, se comparada a corrente MIG/MAG. A penetração do cordão de solda aumentou, conforme houve o aumento da corrente TIG, na faixa que essa corrente era maior que a corrente MIG/MAG, e, na faixa em que a corrente TIG era menor, não houve influência sobre a penetração.

No presente trabalho, por sua vez, foi identificada influência da corrente TIG também para baixas correntes (corrente TIG menor que a corrente MIG/MAG). Este resultado, abre a

possibilidade de utilizar o processo TIG-MIG/MAG, também com baixas correntes no arco TIG para se obter maiores penetrações.

Para Teixeira (2011), os fatores significativos para a penetração do cordão de solda do processo TIG-MIG/MAG, são a velocidade de alimentação do arame, a tensão MIG/MAG, a corrente TIG, a velocidade de soldagem, a interação entre a velocidade de alimentação de arame, a velocidade de soldagem, a interação entre a tensão MIG/MAG e a velocidade de soldagem.

Schneider (2014), afirma que a corrente TIG não apresenta influência significativa sobre a penetração do cordão de solda, pois as variáveis que apresentaram influência 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.

O comportamento da penetração em relação a intensidade de corrente do processo TIG, ficou condizente com o apresentado pela literatura, sendo que o maior valor de intensidade de corrente TIG, gera as maiores penetrações. O gráfico de interação, permite deduzir que há uma interação entre as duas correntes, uma vez que alterar o valor da corrente TIG, altera também o valor final da penetração do cordão de solda.

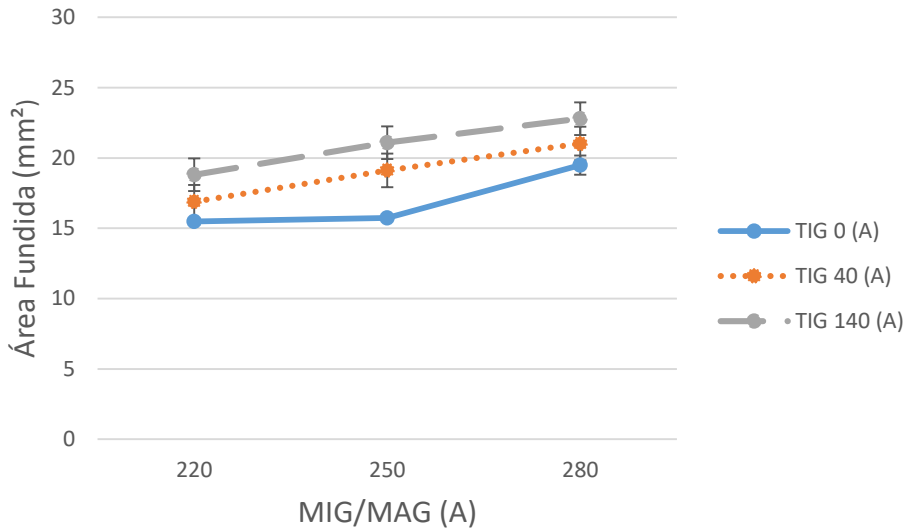
6.2.2 Análise da Área Fundida do Cordão de Solda

A Figura 34, apresenta o gráfico de interação entre as correntes dos circuitos TIG e MIG/MAG no processo TIG-MIG/MAG, com o intuito de comparar a variação do parâmetro área fundida em função das correntes nos dois circuitos.

A área fundida, apresentou comportamento similar ao observado para a penetração, o que está coerente, uma vez que os dois parametros são governados pelos mesmos mecanismos, já discutidos anteriormente.

Teixeira (2011), avaliou os principais fatores significativos para a área fundida do cordão de solda do processo TIG e MIG/MAG. Entre esses fatores analisados, a corrente do processo TIG foi um deles, e como resultado, esse fator não está entre os mais significativos para a área do cordão de solda, mas apresenta interação com outra variável, a velocidade de alimentação do arame.

Figura 34 – Área fundida do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG



Fonte: (Autor)

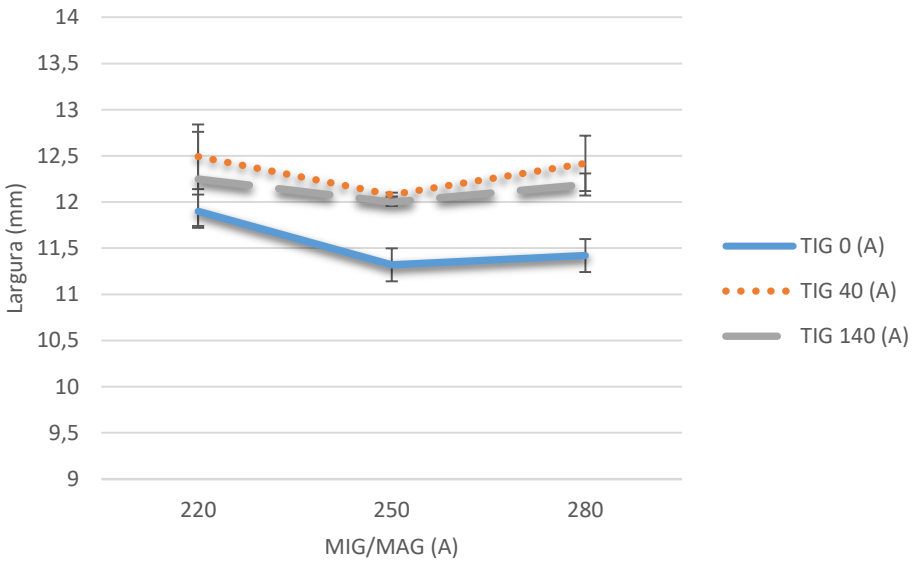
6.2.3 Análise da Largura do cordão de solda

Na Figura 35, é apresentado o gráfico de interação das correntes TIG e MIG/MAG sobre a largura do cordão de solda no Processo TIG-MIG/MAG. Vale ressaltar, que a condição TIG em 0 (zero) ampere, corresponde ao processo MIG/MAG convencional.

Pela Figura 35, pode ser observado que o processo TIG-MIG/MAG, produz cordões de solda com maiores larguras, quando comparado ao processo convecional MIG/MAG. Por outro lado, pode também ser observado, que o valor da corrente TIG pouco influenciou sobre este parâmetro. A presença da corrente TIG em um valor mínimo (40 A), aumentou consideravelmente a largura e um maior valor de corrente neste circuito (140 A), produziu efeito similar.

A princípio, era de se esperar que ao aumentar a corrente no arco TIG, em função do maior aquecimento da chapa e provavelmente uma maior molhabilidade da poça fundida em relação a chapa, aumentasse a largura do cordão de solda, assim como no processo convencional, no entanto, se observa que este ganho de aquecimento foi revertido em aumento da penetração.

Figura 35 - Largura do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG



Fonte: (Autor)

Schneider et al. (2017), apresenta que o conceito do processo convencional TIG para corrente, na qual a maior delas gera as maiores larguras, não se aplica a esse processo por sofrer influências de outras variáveis do processo. O autor destaca ainda, que os maiores valores encontrados para a largura do cordão de solda, foi com a configuração da corrente do processo TIG no valor intermediário, entretanto, a análise de variância para a largura do cordão de solda, aponta a intensidade da corrente TIG como as variáveis que mais influenciaram sobre a lagura.

Conforme sua análise, a medida que o valor da intensidade de corrente TIG aumentou, a largura do cordão de solda reduziu. Logo, comparando os resultados obtidos da presente pesquisa, com o os resultados de Schneider et al. (2017), ambos possuem o mesmo parecer, ou seja, que a maior intensidade de corrente TIG, não gera cordões com maiores larguras.

O fato de o maior valor da intensidade da corrente TIG, não ter apresentado o maior valor da largura do cordão de solda, não significa que esta afirmação seja consistente, pois durante a soldagem do processo TIG-MIG/MAG, estiveram envolvidos diversos parâmetros de dois tipos de soldagem interagindo simultaneamente, o que pode ter influenciado para não ocasionar as maiores larguras.

Para diferentes valores de corrente no circuito MIG/MAG, o comportamento foi similar, tanto no processo MIG/MAG convencional, quanto no processo TIG-MIG/MAG.

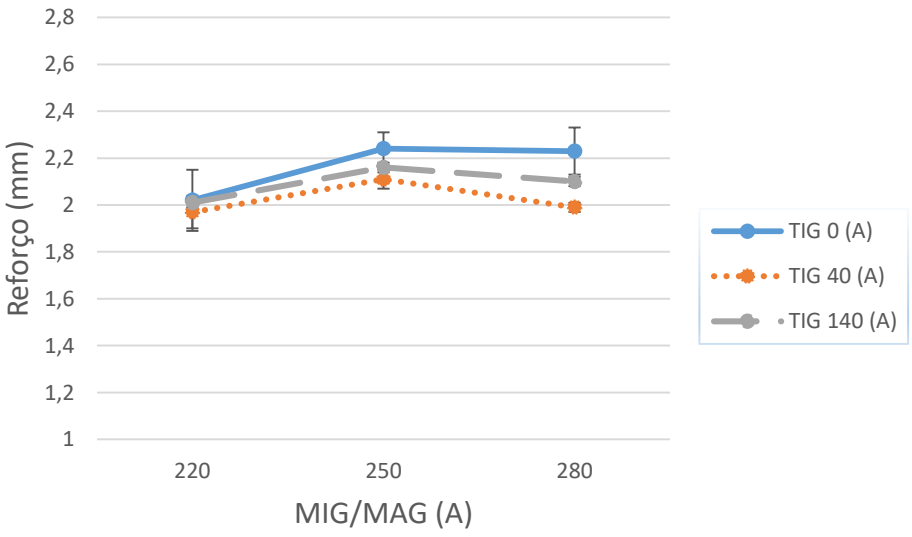
Outra similaridade encontrada com o processo TIG-MIG/MAG, foi com o processo Plasma-MIG, avaliado por Resende et al. (2009). Segundo os autores, a variação da largura com as correntes, segue uma tendência de aumento, conforme é inserido a corrente no circuito Plasma, efeito presente também no processo TIG-MIG/MAG. Outro ponto semelhante é que ao aumentar a corrente Plasma de 60 A para 100 A. não houveram alterações significativas, efeito presente no processo TIG-MIG/MAG, pois aumentar a intensidade de corrente TIG, não gera maiores larguras.

6.2.4 Análise do reforço do cordão de solda

Na Figura 36 é apresentado o gráfico de interação das correntes TIG e MIG/MAG sobre o reforço do cordão de solda no Processo TIG-MIG/MAG.

A Figura 36, indica que o reforço do cordão de solda foi maior para o processo convencional MIG/MAG, quando comparado com o processo TIG-MIG/MAG. O reforço do cordão de solda é governado por outro parâmetro geométrico, a largura do cordão de solda. Conforme se obtem um cordão de solda com maiores larguras, consequentemente se obtem um cordão de solda com menores reforços e vice versa.

Figura 36 - Reforço do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG



Fonte: (Autor)

Essa afirmação está condicente com a largura do cordão de solda, já que as maiores larguras foram obtidas no processo TIG-MIG/MAG, e consequentemente os maiores reforços serião encontrados no processo convencional MIG/MAG.

Os resultados mostram que o emprego do segundo arco TIG e a interação das correntes influenciam nesses dois parâmetros, uma vez que o valor mínimo da corrente TIG gera cordões de solda com maiores larguras e maiores reforços; e o valor máximo gera cordões com menores larguras e maiores reforços.

Considera-se, a partir do gráfico (Figura 36), que a configuração que obteve maiores reforços no processo convencional, foi 250 A; no processo TIG-MIG/MAG, foi a corrente TIG em 140 A; e a corrente MIG/MAG, em 250 A. Já os menores reforços no processo convencional, foi obtido na menor intensidade de corrente 220 A e no processo TIG-MIG/MAG, foi 40 A para a corrente TIG e 220 para a corrente MIG/MAG.

6.2.5 Análise do ângulo de convexidade do cordão de solda

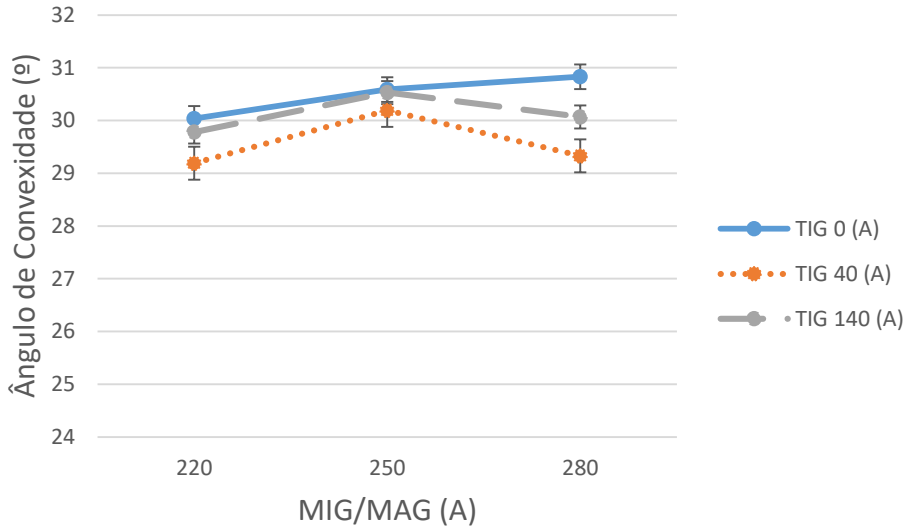
O último parâmetro geométrico analisado é o ângulo de convexidade do cordão de solda. A Figura 37, apresenta o gráfico de interação para o ângulo de convexidade.

A interação das correntes do processo sobre o ângulo de convexidade do cordão de solda, é apresentado no gráfico de interações (Figura 37). Segundo o gráfico, o maior valor encontrado para o ângulo de convexidade, foi no processo convencional MIG/MAG.

Já no processo TIG-MIG/MAG, os maiores valores de ângulo de convexidade, foram encontrados com a corrente do processo TIG no valor máximo 140 A, a corrente do processo MIG/MAG no valor intermediário 250 A.

Já um cordão de solda menos convexo, foi encontrado na configuração intensidade de correte MIG/MAG no valor mínimo 220 A e a intensidade de corrente TIG no valor mínimo 40 A.

Figura 37 – Ângulo de Convexidade do cordão de solda em função da corrente MIG/MAG para três condições de corrente TIG



Fonte: (Autor)

6.3 Considerações Finais

Para as condições experimentais deste trabalho é possível concluir que:

- Alterando os parâmetros de velocidade de soldagem e velocidade de alimentação da parte MIG/MAG do processo é possível atuar na geometria do cordão de solda, assim como no processo convencional;

- Todos as variáveis avaliadas (corrente TIG e corrente MIG/MAG) afetam os parâmetros geométricos do cordão de solda (largura, reforço, área fundida, penetração e ângulo de convexidade);

- Percebe-se uma tendência de aumentar a área fundida ao se inserir a corrente no circuito TIG. Uma maior área fundida e penetração é alcançada com a intensidade de corrente TIG no valor máximo e a intensidade de corrente MIG/MAG, no valor máximo;

- A mesma tendência é apresentada para a largura do cordão de solda, uma vez que inserir a corrente no circuito TIG, aumenta a largura. A maior largura é obtida ao utilizar a intensidade de corrente TIG no valor mínimo e a intensidade de corrente MIG/MAG no valor mínimo;

- Percebe-se que para o reforço, há uma tendência de diminuir quando é inserido a corrente no circuito TIG. O maior reforço é obtido ao utilizar intensidade de corrente TIG no e a intensidade de corrente MIG/MAG no valor máximo;

- E, por fim, o ângulo de convexidade aparenta diminuir com a inserção da corrente no circuito TIG. Um maior ângulo de convexidade é gerado ao utilizar intensidade de corrente TIG e a intensidade de corrente MIG/MAG no valor mínimo.

CAPITULO VII

CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos, com as configurações de operacionalidade do presente trabalho, foi possível concluir que:

- ✓ A bancada experimental para o processo TIG-MIG/MAG instalada no laboratório de fabricação da UFG – Regional Catalão, atende aos requisitos para a execução de soldagens utilizando o processo;
- ✓ Sem alterar os parâmetros de velocidade de soldagem e velocidade de alimentação da parte MIG/MAG do processo é possível atuar na geometria do cordão de solda através da variação dos parâmetros de posicionamento e da corrente no circuito TIG;
- ✓ Todas as variáveis avaliadas (Corrente TIG, ângulo da tocha TIG, ângulo da tocha MIG/MAG e distância entre os eletrodos) afetam os parâmetros geométricos do cordão de solda (largura, reforço, área fundida, penetração e ângulo de convexidade);
- ✓ Trabalhar com o ângulo da tocha TIG no valor máximo, ocasiona em cordões de solda com maior área fundida e de penetração, já os valores mínimos, produzirem cordões com maiores larguras;
- ✓ Atuar com a distância entre os eletrodos no valor máximo, acarretar em cordões de solda com maiores larguras, já os valores mínimos, produzem cordões com maior área fundida, penetração e reforço;
- ✓ No que diz respeito a interação do reforço do cordão de solda com o ângulo da tocha TIG, os maiores valores obtidos foram na posição puxando, no ângulo entre 20 e 25º. Essa mesma configuração se repete para o ângulo de convexidade;

- ✓ Inserindo a corrente no circuito TIG, ocorre um aumento da área fundida e da penetração do cordão de solda. Uma maior intensidade de corrente TIG e corrente MIG/MAG causara cordões com maior área fundida e de penetração;
- ✓ Para a largura do cordão de solda, inserir a corrente no circuito TIG aumenta a largura. A maior largura é obtida ao utilizar a intensidade de corrente TIG e a intensidade de corrente MIG/MAG no valor mínimo;
- ✓ Para o reforço, quando é inserido a corrente no circuito TIG, os valores decrescem. O maior reforço é obtido ao utilizar intensidade de corrente TIG e a intensidade de corrente MIG/MAG no valor máximo.
- ✓ E, por fim, o ângulo de convexidade diminui com a inserção da corrente no circuito TIG. Um maior ângulo de convexidade é gerado ao utilizar intensidade de corrente TIG e a intensidade de corrente MIG/MAG no valor mínimo;
- ✓ É possível identificar similaridades do processo TIG-MIG/MAG com outros processos associados, como exemplo, o processo Plasma-MIG, o qual obteve a mesma análise dos parâmetros reforço e largura do cordão de solda.

CAPÍTULO VIII

PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se:

- Otimização dos parâmetros de soldagem a fim de atingir resultados mais significativos em relação ao processo de soldagem MIG/MAG convencional;
- A continuidade dos estudos do processo de soldagem TIG-MIG/MAG, através de ensaios de tração, fadiga e tenacidade à fratura, com a tocha MIG/MAG a frente da tocha TIG, para entender o comportamento e as particularidades do processo;
- Execução de cordões de solda com as tochas invertidas, com a tocha MIG/MAG a frente da tocha TIG, empregando as mesmas condições de operacionalidade do presente trabalho, a fim de realizar comparações dos resultados;
- Realizar um estudo em função dos resultados obtidos, para compreender se o processo TIG-MIG/MAG tem potencial técnico e econômico para ser aplicado na indústria;
- Identificar faixas operacionais de parâmetros para o processo, além de analisar outras variáveis de soldagem que não foram abordadas no presente trabalho e que podem influenciar na geometria do cordão de solda, como o tipo de gás de proteção, vazão, influência do ângulo da ponta do eletrodo TIG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS, Welding Handbook: **Welding Process** (vol II), AWS, USA, 8th Edition, 1991, cap 4, 955 p. (ISBN 0-87171-354-3).

BRACARENSE, A.Q. Gás Metal Arc Welding. (2003) **Infosolda o site brasileiro de soldagem.** Disponível em: www.infosolda.com.br/artigos/proso118.pdf.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Empirical model building and response surfaces**. 1. Ed. New York: John Wiley & Sons, 670 p 1987.

CHEN, J.; WU, C.S.; CHEN, M.A. Improvement of welding heat source models for TIG-MIG hybrid welding process. **J. Manuf**. Process, 2014.

CHEN, J.; ZONG, R.; WU, C. PADHY, G. K.; HU, Q. Influence of low current auxiliary TIG arc on high speed TIG-MIG hybrid welding**. Journal of Materials Processing Technology**. *2016. Cap 1, 2p. cap 4, 12 p.*

CIRINO, L.M. **Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, fevereiro de 2009.

CONAGIN, A. Delineamentos "compostos centrais ortogonais, rotacionais e divisíveis em blocos" Bragantina, **Revista Científica do estudo agronômico**, Campinas, Marco de 1982

CUNHA, L. J. G**. Solda: como, quando e por quê**. D.C. Luzzatp Ed., Porto Alegre, RS, 1985.

CUNHA, T. V. **Desenvolvimento de equipamento e de metodologia de parametrização para a soldagem orbital TIG**. Florianópolis: Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, UFSC, Out. 2008.

DIAZ, V.V.; DUTRA, J.C.; OLIVEIRA, A.S.S.C.M.; Uma Contribuição ao Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido (PTA) para Posições Forçadas. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo Vol. 16, No. 1, p.033-043, Jan/Mar 2011.

DILLENBECK, V. R.; CASTAGNO, L. The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel, **Welding Journal**, pg. 45-49 set., 1987.

DING, M.; LY, S.S.; ZHENG, Y.; WANG, Y.C.; LI, H.; XING, W.Q.; YU, X.Y.; DONG, P. TIG-MIG hybrid welding of ferritic stainless steels and magnesium alloys with Cu interlayer of different thickness. **Mater. Design,** 2015.

DYKHNO, I.; DAVIS, R. **Joining GMAW and GTAW – Hybrid Welding Takes on a Whole New Meaning with New Technology Developments**. Novembro 7, 2006; Acesso em: 11 de junho de 2018. Disponível em: http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/ joining-gmaw-and-gtaw.

FILHO, D.F.; BÁLSAMO, P.S.S.; FERRARESI, V.A. Influência do tipo de gás de proteção da soldagem mig/mag na qualidade do cordão de aço inoxidável In: 4° **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Águas de São Pedro, 2007.

FOGAGNOLO, F.B. **Introdução a processos e metalurgia da soldagem**. Apostila. Campinas: UNICAMP. 2011.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC/USP, 2002

GROOVER, M. P. Introduction to manufacturing processes first edition Copyright © 2012 **John Wiley & Sons**, Inc.

HIRATA, E.K.; BELTZAC, L.F.; OKIMOTO, P.C.; SCOTTI, A. Influência da Corrente sobre o Rendimento Bruto de Fusão em Soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção** São Paulo, Vol. 19, Nº. 02, p.159-167, 2014.

INFOSOLDA. O Portal Brasileiro de Soldagem. **Processo TIG – eletrodo**. 20 de fevereiro, 2013.Disponível em: http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-enai/processos/168-processo-tig-eletrodo. Acessado em: 20/04/2018.

KANEMARU, S., SASAKI, T., SATO, T., & TANAKA, M. Basic Study on TIG-MIG Hybrid Welding Process. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, 30(1), 29–34. Soc. **2012**, 30, 29–34.

KANEMARU, S. SASAKI, T. SATO, T. MISHIMA, H. TASHIRO, S. TANAKA, M. Study for TIG–MIG hybrid welding process. **International Institute of Welding,** 2013.

LYTTLE, K. A.; STAPON, F. G. Select the Best Shielding Gas Blend for the Aplication, **Welding Journal**, p.21-28, nov. 1990.

MARQUES, P. V.; MODENESi, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia.** Alexandre Queiroz – 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MENG, X.; QIN, G.; ZHANG, Y.; FU, B.; ZOU, Z. High speed TIG-MAG hybrid arc welding of mild steel plate. **Journal of Materials Processing Technology**. 2014, 214, 2417–2424

MESSLER, J.R.W. What is next for Hybrid Welding? **Welding Journal**. 2004, 83, 30–34.

MISHIMA, H.; TASHIRO, S.; KANEMARU, S.; TANAKA, M. Numerical simulation on plasma property in TIG-MIG hybrid welding process. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, 2013.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. 100p. Apostila Didática - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

MONTGOMERY, D.C. (1991) **Design and Analysis of Experiments**. 3 rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 493 p. 2009.

NORRISH, J. **Advanced welding process**. IOP Publishing Ltd, 1992. 375 p. ISBN: 0-85274-325-4.

OLIVEIRA, M. A. **Desenvolvimento no processo híbrido Plasma-MIG para operações de soldagem e brasagem**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

PRITCHARD, D**. Soldering, Brazing & Welding – A Manual of Techniques.** Crowood Press, 2001.

(ESTATCAMP) Experimentos Fatoriais 2^k. Acesso em: Setembro, 2018. Disponível em: http://www.portalaction.com.br/planejamento-de-experimento/31-experimentos-fatoriais-2k.

RESENDE, A.A.; FERRARESI, V.A.; SCOTTI, A.; DUTRA, J.C. Influência das correntes de soldagem do processo Plasma-MIG sobre a geometria do cordão de solda e taxa de fusão do arame. **Soldagem & Inspeção**. 14, 320–328.2009,

RESENDE, A. A.; **Uma Contribuição à análise dos parâmetros de soldagem do processo Plasma-Mig com eletrodos concêntricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2009.

RESENDE, A. A; **Estudo de Características Operacionais do processo "PLASMA MIG" com arcos concêntricos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

SAHASRABUDHE O.S. RAUT D.N. Analytic framework on parameter ranking for hybrid TIG MAG arc welding of mild steel. **Journal of Advanced Research**. 12 27–37 (2018)

SCOTTI, A. & RODRIGUES, C.E.A.L., Determination of momentum as a mean of quantifying the mechanical energy delivered by droplets during MIG/MAG welding, **Eur. Phys.J. Appl. Phys**, 2009.

SCHNEIDER, C. F**. Otimização de um processo de soldagem híbrida tig–mig/mag utilizando o método Taguchi.** Trabalho Final de Curso. FAHOR. Horizontina, 2014.

SCHNEIDER, C. F. LISBOA, C.P. SILVA, R. D. A. RICHARD, T. L. Optimizing the Parameters of TIG-MIG/MAG Hybrid Welding on the Geometry of Bead Welding Using the Taguchi Method. Article. **Jornal of Manufacturing and Materials Processing**, 12 Oct. 2017.

SCOTTI, A. PONAMAREV, V. Soldagem MIG/MAG**: Melhor entendimento melhor desempenho.** São Paulo: Artliber Editora, 2008.

SCOTTI, A. & RODRIGUES, C.E.A.L., Determination of momentum as a mean of quantifying the mechanical energy delivered by droplets during MIG/MAG welding, **Eur. Phys. J. Appl. Phys**. 45 (1), 2009, pp 11201, p1-p8, DOI: 10.1051/ epjap:2008196

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**. Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol.16, No. 4, p.333-340, out/Dez 2011.

SILVA, R.H.G.; **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, fevereiro de 2005.

SINGH, A.K.; DEY, V. RAI, R.N. Techniques to improveweld penetration in TIG welding (A review). Fifth International Conference of Materials Processing and Characterization**. National Institute of Technology***,* Agartala- 799046*, India, 2017.*

SOUZA, D. RESENDE, A. A. SCOTTI, A. Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol. 14, No. 3, p.192-198, Jul/Set 2009.

SOUZA, D.; ROSSI, M.L.; KEOCHEGUERIANS, F. NASCIMENTO, V. C.; VILARINHO, L.O.; SCOTTI, A. Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito**. Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol.16, No. 2, p.114-122, Abr/Jun 2011.

SOUZA, C. I.; FERRARESI, V.A. Análise Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-circuito na Posição Horizontal. **Soldagem & Inspeção**. Sp. S Snsp. Szont8, N8, 03, p.268-280, Jul/Set 2013.

SOUZA, L.H.; XAVIER, C.R.; MEDEIROS, N.; MARCELO, C.J.; MOREIRA, L.P. Avaliação da soldagem TIG autógena sobre as características dimensionais da solda do aço AISI

304L**. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Fortaleza – Ceará. 21 a 25 de agosto de 2016.

SPS – **Sistemas e Processos de Soldagem**. (2012) Disponível em: http://www.sps-soldagem.com.br/tartilope_v2.php. Acessado em: 21/08/2018

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J. Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares, Soldagem & Inspeção, São Paulo, v.11, n.3, p.147-155, 2006.

TAKANO, E. H.; QUEIROZ, D.; D'OLIVEIRA, A.S.C.M., Avaliação dos parâmetros de processamento por PTA nas superfícies processadas. **Soldagem & Inspeção**. 2008.

TATAGIBA, L.C.S. GONÇALVES, R.B. PARANHOS, R. Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol.17, Nº. 3, p. 218-228, 2012.

TEIXEIRA, G.S. **Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG – MAG em tandem**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

TSENG, K.-H. Development and application of oxide-based flux powder for tungsten inert gas welding of austenitic stainless steels, **Powder Technology** 233 pp. 72–79. (2013)

UZUN, A. The effect of welding speed on the weod seam profile in mag and tig/mag hynrid arc welding. **Practical Metallography**. Carl Hanser Verlag, 2017.

VILARINHO, L.O. Modos de Transferência Metálica: Naturais e Controlados. **Revista da Soldagem,** 10 de maio 2007.

ZHANG, Y.; HUANG, J.; CHENG, Z.; Ye, Z.; CHI, H.; PENG, L.; CHEN, S. Study on MIG-TIG double-sided arc welding-brazing of aluminum and stainless steel. **Mater. Lett**, 2016.

ZHANG, Y. HUANG J. CHENG Z. YE Z. An investigation on butt joints of Ti6Al4V and 5A06 using MIG/TIG double-side arc welding-brazing. **Journal of Manufacturing Processes**. 221–225, 2017.

APÊNDICE A

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

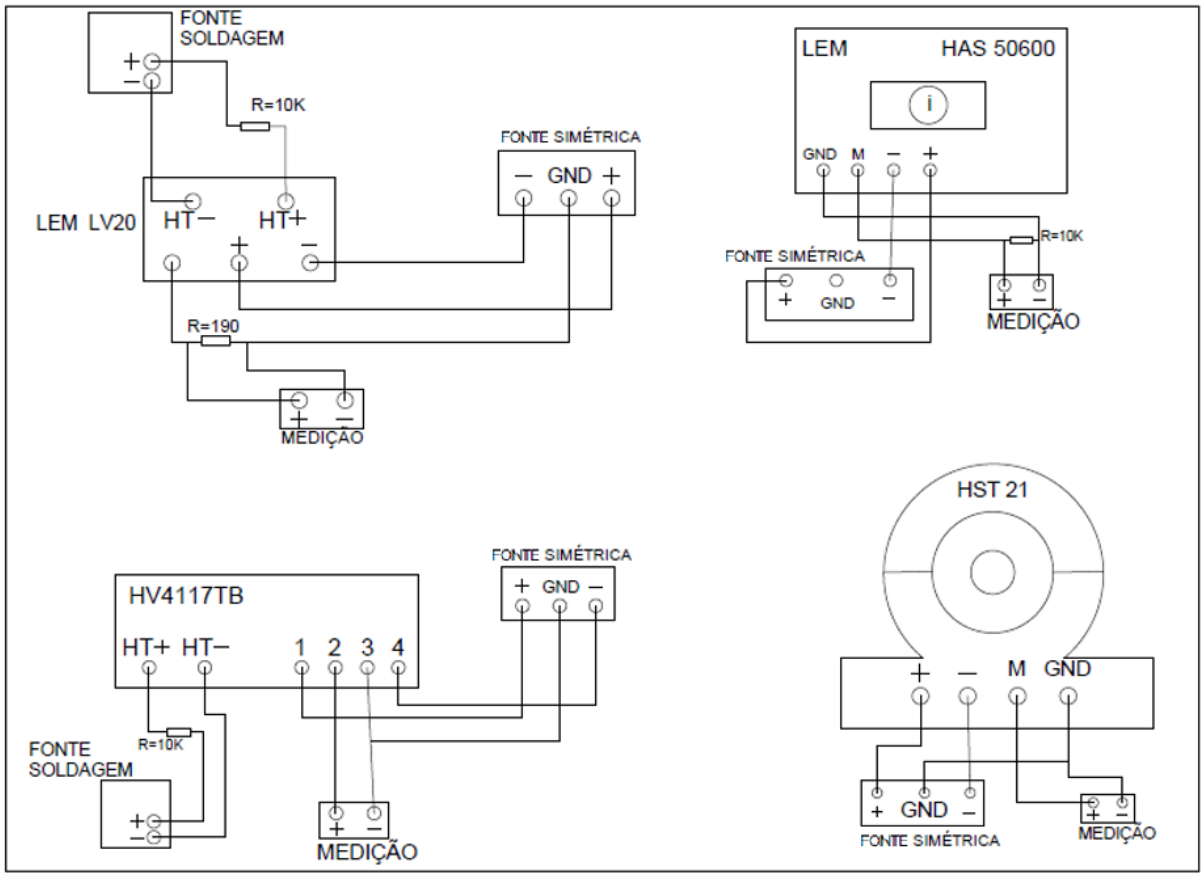
O sistema de aquisição de dados elétricos de corrente e tensão, utilizado neste trabalho, foi desenvolvido em parceria com a Engenheira Gabriella Cristina Costa e apoio do técnico de laboratório Iago Ferreira.

Os componentes necessários para a montagem do sistema de aquisição de dados estão listados abaixo:

- Transdutor de corrente da marca LEM, modelo HAS 400-S, que mede na faixa de ± 400 A e transdutor de corrente da marca YHDC, modelo HST21 – 500, que mede ± 500 A, sendo que os mesmos são isolados galvanicamente entre os circuitos primários e secundários e têm alta resistência a interferências externas, não causando interferência no processo de soldagem;
- Sensor de tensão da marca LEM, modelo LV 20-P e mede na faixa de 10 a 500V e sensor de tensão, marca YHDC, modelo HV 4117TB e mede até 200V;
- Fonte simétrica -12V/0V/+12V, para alimentação dos sensores;
- Sistema condicionador de corrente e tensão;
- Placa de aquisição de sinais modelo NI USB-6008, de 12-Bits, 10 mil amostras por segundo, *Multifunction* DAQ;
- Interface com computador para registro, análise e armazenamento dos dados.

A Figura A.1, apresenta o esquema do sistema elétrico que foi utilizado na construção do sistema de aquisição, a qual ilustra como foi feita a ligação de cada transdutor e sensor na fonte de alimentação do sistema (fonte simétrica), na fonte de soldagem e nos ramos para medição.

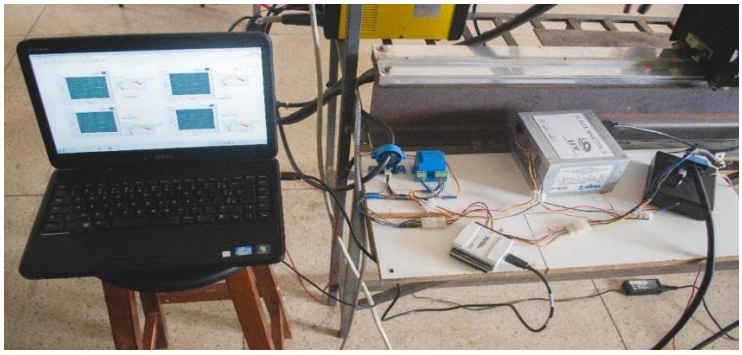
Figura A.1 – Sistema Elétrico



Fonte: (Autor)

A Figura A.2 apresenta uma visão geral do sistema de aquisição desenvolvido.

Figura A.2 – Sistema de Aquisição montado na bancada

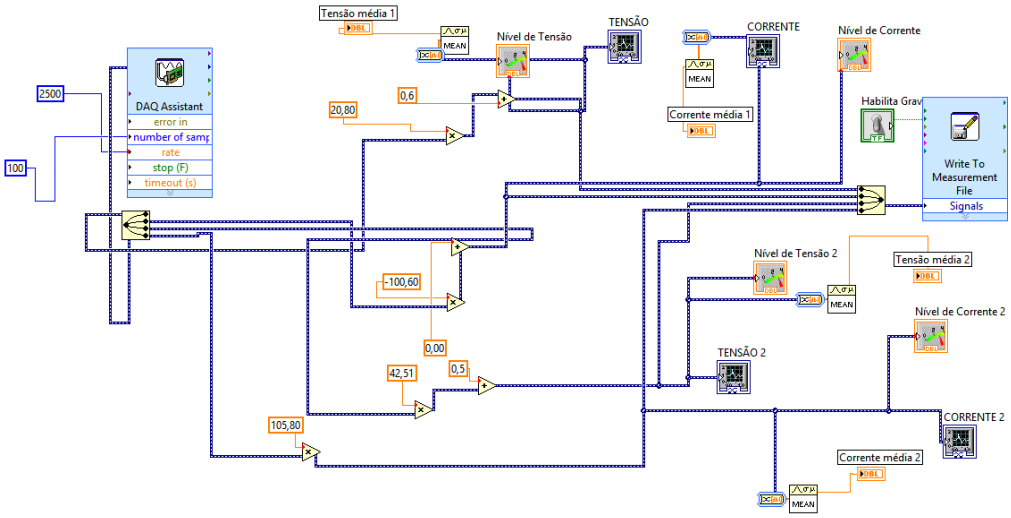


Fonte: (Autor)

A figura A.3 e A.4 ilustram respectivamente a janela de programação gráfica e a interface desenvolvoda com o usuário. Para tanto, foram utilizados os seguintes módulos:

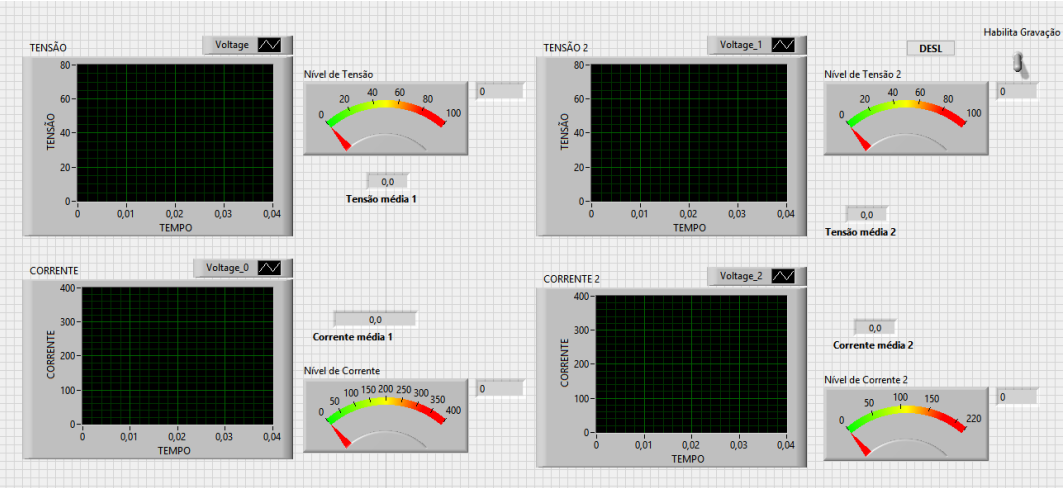
- *DAQ Assistant*: Módulo utilizado para conectar o software aos sinais enviados pela placa de aquisição;
- Módulos numéricos: Módulos que realizam a multiplicação dos sinais captados pela placa;
- Módulos estatísticos: Módulos que calculam as médias dos sinais captados;
- *Write To Measurement* File: Módulo que lê e salva os dados coletados em uma planilha eletrônica;
- Módulos indicadores: Módulos que transformam os sinais em resultados representativos como gráficos.

Figura A.3 – Diagrama de blocos da programação



Fonte: (Autor)

Figura A.4 – Interface do Sistema de Aquisição



Fonte: (Autor)

APÊNDICE B

Medidas Geométricas Referentes aos Testes do Capítulo IV

As tabelas B.1 e B.2 apresentam, respectivamente, os resultados das medições 1 e 2 utilizadas para o cálculo dos valores médios apresentados no capítulo IV.

Tabela B.1 – Medida 1 – Capítulo IV

Testes	Área depositada (mm²)	Área fundida (mm²)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Ângulo (º)	Largura (mm)
1	17,56	15,06	1,48	2,35	27,53	12,42
2	17,05	21,84	2,38	2,06	36,87	13,68
3	15,60	12,35	1,37	1,90	26,76	12,35
4	16,77	16,83	1,91	2,38	26,48	12,54
5	18,13	19,28	1,77	2,17	30,03	12,84
6	18,08	17,18	1,99	2,24	37,28	12,43
7	14,33	21,07	1,81	2,13	27,02	11,82
8	18,91	17,18	1,84	2,27	29,25	12,95
9	18,69	20,72	2,28	2,24	21,49	14,25
10	19,11	18,08	2,06	2,47	33,87	13,14
11	18,46	14,94	2,56	2,13	34,00	12,31
12	17,09	17,45	1,89	2,02	21,67	13,86
13	15,26	12,53	1,77	2,02	30,53	11,59
14	17,67	18,98	1,37	2,02	28,65	13,11
15	17,11	11,56	1,26	2,02	34,76	12,01
16	18,50	12,11	1,49	2,09	26,28	13,03

Fonte: (Autor).

Tabela B.2 – Medida 2 – Capítulo IV

Testes	AD (mm²)	Área fundida (mm²)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Ângulo (º)	Largura (mm)
1	16,92	14,45	1,45	2,30	27,30	12,33
2	16,63	19,69	2,13	2,01	34,99	13,25
3	14,86	12,92	1,27	1,98	26,92	12,07
4	17,04	16,24	1,80	2,37	27,50	12,59
5	16,81	18,06	1,71	2,14	29,64	12,48
6	17,41	16,2	1,75	2,2	36,68	12,18
7	14,13	19,72	1,80	2,03	26,90	11,71
8	17,96	16,54	1,66	2,21	29,00	12,66
9	18.64	21,00	2,15	2,13	22,57	13,97
10	17,1	19,09	1,96	2,3	32,39	12,85
11	17,72	13,73	1,89	2,18	35,3	11,98
12	15,57	16,17	1,68	1,97	21,56	13,69
13	15,03	12,39	1,59	2,05	33,15	11,23
14	16,51	16,92	1,40	2,03	29,36	12,74
15	16,24	11,29	1,26	2,1	35,43	11,70
16	16,57	12,90	1,48	2,05	27,55	12,80

Fonte: (Autor).

APÊNDICE C

Medidas Geométrica Referentes aos Testes do Capítulo V

As tabelas C.1 e C.2 apresentam, respectivamente, os resultados das medições 1 e 2 utilizadas para o cálculo dos valores médios, apresentados no capítulo V.

Tabela C.1 – Medida 1 - Capítulo V

Testes	AD (mm²)	Área fundida (mm²)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Ângulo (º)	Largura (mm)
1	15,94	15,13	1,56	2,19	33,23	11,93
2	15,89	14,62	1,35	1,93	31,84	12,03
3	18,95	15,70	1,99	2,11	26,68	12,68
4	16,11	18,19	1,50	1,86	26,73	12,95
5	15,69	16,15	1,50	2,02	26,43	12,7
6	17,2	16,44	1,58	2,16	31,78	12,28
7	18,00	16,27	1,60	2,04	33,08	12,45
8	18,1	18,25	1,73	1,98	27,01	12,65
9	17,54	16,29	1,48	1,98	30,01	12,45
10	18,16	20,96	1,93	2,08	24,84	12,37

Fonte: (Autor).

Tabela C.2 – Medida 2 – Capítulo V

Testes	AD (mm²)	Área fundida (mm²)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Ângulo (º)	Largura (mm)
1	16,00	16,00	1,5	2,21	33,55	11,58
2	15,69	14,59	1,46	1,97	31,86	11,95
3	17,59	18,79	1,95	2,11	27,39	12,87
4	16,24	15,51	1,54	1,88	26,29	12,95
5	16,40	14,76	1,52	2,07	26,43	12,05
6	16,89	16,71	1,54	2,13	31,3	12,38
7	16,01	17,88	1,62	2,09	32,6	12,44
8	16,15	17,73	1,52	2,07	27,68	12,52
9	17,57	17,17	1,54	1,97	31,43	12,66
10	17,40	21,2	1,88	2,12	33,09	12,49

Fonte: (Autor).

APÊNDICE D

Medidas Geométrica Referentes aos Testes do Capítulo VI

As tabelas D.1 e D.2 apresentam, respectivamente, os resultados das medições 1 e 2 utilizadas para o cálculo dos valores médios dos parâmetros geométricos apresentados no capítulo VI.

Tabela D.1 – Medida 1 - capítulo VI

Testes	Área depositada (mm^2)	Área fundida (mm^2)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Ângulo (º)	Largura (mm)
1	16,16	15,73	1,62	2,29	30,30	11,28
2	17,63	15,64	1,56	2,12	30,00	12,27
3	16,31	18,92	1,99	2,31	30,50	11,35
4	16,98	20,63	2,03	2,01	29,10	12,64
5	18,46	22,81	2,19	2,09	30,00	12,28
6	16,79	18,69	1,73	2,00	29,60	12,59
7	17,61	17,23	1,68	1,98	29,12	12,74
8	16,24	19,03	1,79	2,14	30,05	12,07
9	16,09	20,92	1,94	2,18	30,15	12,03

Fonte: (Autor).

Tabela D.2 – Medida 2 - capítulo VI

Testes	**Área depositada (mm²)**	**Área fundida (mm²)**	**Penetração (mm)**	**Reforço (mm)**	**Ângulo (º)**	**Largura (mm)**
1	16,28	15,74	1,56	2,19	30,58	11,36
2	17,3	15,32	1,44	1,93	30,08	11,53
3	16,16	19,89	1,88	2,16	30,90	11,49
4	16,5	21,41	1,97	1,97	29,56	12,21
5	18,00	22,80	2,01	2,12	30,15	12,1
6	16,34	18,91	1,67	2,03	29,80	11,86
7	17,32	16,55	1,51	1,97	29,27	12,24
8	16,2	19,22	1,93	2,08	30,25	12,1
9	16,15	21,26	1,97	2,14	30,95	11,97

Fonte: (Autor).