

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**AVALIAÇÃO DE POTENCIALIDADES DO PROCESSO  
DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG COM VARIAÇÃO DE  
POLARIDADE NO ELETRODO MIG/MAG**

**GABRIELLA CRISTINA DA SILVA COSTA**

**Catalão – GO**

**2019**

---

**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:     Dissertação     Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

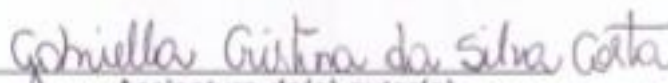
Nome completo do autor: **GABRIELLA CRISTINA DA SILVA COSTA**

Título do trabalho: **AVALIAÇÃO DE POTENCIALIDADES DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG COM VARIAÇÃO DE POLARIDADE NO ELETRODO MIG/MAG.**

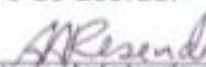
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO

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

  
Assinatura do(a) autor(a)

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)

Data: 13 / 08 / 2019

# **AVALIAÇÃO DE POTENCIALIDADES DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG COM VARIAÇÃO DE POLARIDADE NO ELETRODO MIG/MAG**

**GABRIELLA CRISTINA DA SILVA COSTA**

**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**

**2019**

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

Costa, Gabriella Cristina da Silva

Avaliação de potencialidades do processo de soldagem TIG MIG/MAG com variação de polaridade no eletrodo MIG/MAG. [manuscrito] / Gabriella Cristina da Silva Costa. - 2019.

CXVIII, 118 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. Apêndice.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Soldagem híbrida. 2. TIG-MIG/MAG. 3. Parâmetros de soldagem. 4. Geometria de cordão de solda. I. Resende, André Alves de, orient. II. Título.

CDU 669



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 08/2019 da sessão de Defesa de Dissertação de **GABRIELLA CRISTINA DA SILVA COSTA** que confere o título de Mestra em **Engenharia de Produção**, na área de concentração em **Engenharia de Operações e Processos Industriais**.

Ao/s quinze dias do mês de julho de dois mil e dezenove, a partir da(s) 13 horas, na sala do mestrado da FENG/RC, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG NA POLARIDADE DIRETA". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **André Alves de Resende (PPGEP)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Carlos Antonio Ribeiro Duarte (PPGEP)**, membro titular interno; Professor Doutor **Demostenes Ferreira Filho (UFG)** cuja participação ocorreu através de videoconferência. Durante a arguição os membros da banca fizeram sugestão de alteração do título do trabalho, conforme explicitado abaixo. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido a candidata aprovada pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **André Alves de Resende**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos quinze dias do mês de julho de dois mil e dezenove.

### TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

AVALIAÇÃO DE POTENCIALIDADES DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MIG/MAG COM VARIAÇÃO DE POLARIDADE NO ELETRODO MIG/MAG.



Documento assinado eletronicamente por **Andre Alves De Resende, Orientador**, em 15/07/2019, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 15/07/2019, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Antonio Ribeiro Duarte, Professor do Magistério Superior**, em 17/07/2019, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0768462** e o código CRC **35C4796A**.

*A Deus  
A minha mãe Lúcia  
A toda minha família e amigos pelo incentivo e apoio.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por iluminar meu caminho e abençoar todos meus passos durante toda minha vida, fonte de força no decorrer desta caminhada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão pela contribuição para meu crescimento acadêmico. Ao Laboratório de Fabricação Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão pela disponibilidade de espaço, materiais e equipamentos sem os quais esta pesquisa não se realizaria.

Ao Prof. Dr. André Alves de Resende pela orientação, disponibilidade, conselhos, estímulos no decorrer da pesquisa e pela paciência muito necessária em alguns momentos de ausência seguidos por momentos de desespero, sem seu compromisso este estudo não teria se desenvolvido.

À Lúcia Divina da Silva, por me dar a vida, e demonstrar todo seu amor por mim ao proporcionar todas as condições para que eu esteja aqui realizando este estudo. À Maria Aparecida, avó amada, e toda minha família pelos cuidados, amor e orações dedicadas a mim. À Marcos André Mahs por ser o porto seguro em todos os momentos e fonte de incentivo e apoio total.

A colega de laboratório Sarah Cristina Azevedo por ter contribuído com realização do estudo e aos colegas Iago e Gabriel pelo apoio técnico e auxílio na realização dos experimentos.

À todos que de alguma maneira contribuíram na realização deste trabalho.

*“As raízes da educação são amargas, mas os frutos são doces.”*

*Aristóteles*

COSTA, G. C. S. **Avaliação de potencialidades do processo de soldagem TIG-MIG/MAG com variação de polaridade no eletrodo MIG/MAG.** 118 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO. 2019.

## RESUMO

O presente estudo propõe uma contribuição para a melhoria dos processos produtivos por meio do estudo de processos híbridos de soldagem. Tem como objetivo avaliar os efeitos proporcionados pela associação de dois processos convencionais de soldagem no comportamento dos sinais de tensão e corrente de soldagem, na capacidade produtiva e na geometria da solda obtida. Neste caso, os processos de soldagem a arco TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) são associados e dão origem ao processo TIG-MIG/MAG. Os testes foram realizados seguindo um planejamento fatorial, através de simples deposição em chapas de aço SAE 1020 de espessura 6,35 mm. Foram realizados experimentos variando a polaridade da parte MIG/MAG do processo e a corrente da parte TIG do processo. Os dados dos sinais de tensão e corrente do processo TIG-MIG/MAG demonstraram que, no momento de inserção do arco MIG/MAG no processo, os sinais realinharam suas intensidades a fim de estabilizar o processo. A análise de capacidade produtiva evidenciou que o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta têm melhores taxas de deposição e fusão, se comparados com os resultados obtidos para a polaridade convencional. Através da análise de variância foi identificado que a polaridade MIG/MAG é o fator mais influente nos resultados de geometria do cordão de solda. O processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta pode gerar cordões com maiores larguras, penetrações e áreas fundidas e menores reforços quando comparados com o processo MIG/MAG convencional na polaridade direta, abrindo a possibilidade de soldar nesta polaridade. E por fim, a presença do arco TIG foi capaz de reduzir a convexidade dos cordões de solda, independente da polaridade.

**Palavras-chave:** Soldagem híbrida, TIG-MIG/MAG, Parâmetros de soldagem, Geometria de cordão de solda.

COSTA, G. C. S. **Evaluation of the potential of the TIG-MIG/MAG welding process with polarity variation in the MIG/MAG electrode.** 118 p. Master Dissertation, Federal University of Goiás, Catalão, GO. 2019.

## **ABSTRACT**

This study proposes a contribution to the improvement of production processes through the study of hybrid welding processes. It aims to evaluate the effects provided by the association of two conventional welding processes on the behavior of the welding voltage and current signals, on the production capacity and on the geometry of the weld obtained. In this case, the arc welding processes TIG (Tungsten Inert Gas) and MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) are associated and give rise to the TIG-MIG/MAG process. The tests were performed following a factorial planning, through simple deposition in SAE 1020 steel plates of 6.35 mm thickness. Experiments were performed varying the polarity of the MIG/MAG part of the process and the current of the TIG part of the process. The data of the voltage and current signals of the TIG-MIG/MAG process demonstrated that at the moment of insertion of the MIG/MAG arc in the process, the signals realigned their intensities in order to stabilize the process. The productive capacity analysis showed that the TIG-MIG/MAG process with the MIG/MAG electrode in direct polarity has better rates of deposition and fusion, if compared with the results obtained for conventional polarity. Through the analysis of variance it was identified that MIG/MAG polarity is the most influential factor in the results of weld bead geometry. The TIG-MIG/MAG process with the MIG/MAG electrode in direct polarity can generate larger widths, penetrations and molten areas and smaller reinforcements when compared to the conventional MIG/MAG process in direct polarity, opening the possibility of welding in this polarity. And finally, the presence of the TIG arc was able to reduce the convexity of the weld beads, regardless of the polarity.

**Keywords:** Hybrid welding, TIG-MIG / MAG, Welding parameters, Weld bead geometry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema esquemático de operação GTAW. ....	24
Figura 2 - Equipamentos utilizados no processo TIG. ....	24
Figura 3 - Características dos tipos de corrente no processo TIG. ....	26
Figura 4 - Processo esquemático de soldagem MIG/MAG. ....	28
Figura 5 - Equipamentos utilizados no processo MIG/MAG. ....	29
Figura 6 - Modos naturais de transferência metálica em soldagem MIG/MAG. ....	31
Figura 7 - Características do cordão de solda em CCEP (inversa) e CCEN (direta). ....	32
Figura 8 - Efeito das diferentes extensões de eletrodo na geometria do cordão. ....	33
Figura 9 - Efeito da posição do eletrodo e ângulo de deslocamento sobre o cordão. ....	34
Figura 10 - Processo de soldagem híbrida. ....	35
Figura 11 - Modelo esquemático de soldagem TIG-MIG/MAG. ....	36
Figura 12 - Modelo esquemático de soldagem MIG-TIG de dupla face. ....	37
Figura 13 - Modelo esquemático de soldagem MIG-TIG de dupla face com tocha auxiliar. ....	38
Figura 14 - Equipamentos utilizados. ....	43
Figura 15 - Sistema de aquisição e condicionamento de dados. 1 - Computador com programação de aquisição; 2 - Fonte simétrica +/- 12 V para alimentação dos sensores; 3 - Módulo 1; 4 - Módulo 2; 5 - Placa NI-USB-6008. ....	43
Figura 16 - Delimitação dos cortes do experimento para macrografia. ....	45
Figura 17 - Passos para condução de um projeto de experimentos. ....	45
Figura 18 - Principais características do cordão de solda ....	46
Figura 19 - Oscilograma para o processo TIG-MIG/MAG com o circuito MIG/MAG na polaridade direta. ....	50
Figura 20 - Oscilograma para o processo TIG-MIG/MAG com o circuito MIG/MAG na polaridade convencional. ....	51
Figura 21 - Modelo elétrico para o processo Plasma-MIG segundo Matthles e Kohler. ....	52
Figura 22 - Oscilograma para o processo TIG-MIG/MAG convencional com 50 A no circuito TIG. ....	53
Figura 23 - Oscilograma de TIG-MIG/MAG convencional com TIG a 150 A. ....	54
Figura 24 - Oscilograma de TIG-MIG/MAG direto com TIG a 150 A. ....	55
Figura 25 - Oscilograma de TIG-MIG/MAG direto com TIG a 50 A. ....	56
Figura 26 - Resultados análise de variância. ....	57
Figura 27 - Interação de variáveis com relação ao reforço. ....	58
Figura 28 - Efeitos principais das variáveis com relação ao reforço. ....	58
Figura 29 - Interação de variáveis com relação a penetração. ....	59

Figura 30 - Efeitos principais das variáveis com relação à penetração. ....	59
Figura 31 - Interação de variáveis com relação à largura.....	60
Figura 32 - Efeitos principais das variáveis com relação à largura.....	61
Figura 33 - Interação de variáveis com relação à área fundida. ....	62
Figura 34 - Efeitos principais das variáveis com relação à área fundida. ....	62
Figura 35 - Interação de variáveis com relação ao ângulo de contato do cordão.....	63
Figura 36 - Efeitos principais das variáveis com relação ao ângulo de contato do cordão. ..	63
Figura 37 – Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem MIG/MAG com polaridade inversa. (a) comportamento dos sinais em 200 ms. (b) comportamento dos sinais em todo processo.....	69
Figura 38 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem MIG/MAG com polaridade direta. (a) comportamento dos sinais em 200 ms. (b) comportamento dos sinais em todo processo.....	70
Figura 39 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e $I_{TIG}$ a 50 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo. ....	71
Figura 40 – Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e $I_{TIG}$ a 50 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 2000 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo. ....	73
Figura 41 - Gráfico de potência instantânea média para o processo MIG/MAG. ....	74
Figura 42 - Gráfico de potência instantânea média do processo TIG-MIG/MAG.....	75
Figura 43 - Taxa de deposição x Corrente utilizada nos experimentos. ....	78
Figura 44 – Taxa de deposição para arames e gases de proteção em função do aumento da corrente para o processo MIG/MAG. ....	79
Figura 45 - Rendimento de deposição x Corrente utilizada nos experimentos. ....	80
Figura 46 - Resultados da análise de Variância. ....	84
Figura 47 - Gráfico de efeitos principais para a largura.....	85
Figura 48 - Gráfico de interação para a largura.....	86
Figura 49 - Gráfico de efeitos principais para o reforço.....	87
Figura 50 - Gráfico de interação para o reforço.....	87
Figura 51 - Gráfico de efeitos principais para a penetração. ....	88
Figura 52 - Gráfico de interação para a penetração. ....	88
Figura 53 - Gráfico de efeitos principais para a área fundida. ....	89
Figura 54 - Gráfico de interação para a área fundida. ....	90
Figura 55 - Gráfico de efeitos principais para os ângulos de contato. ....	91

Figura 56 - Gráfico de interação para os ângulos de contato.....	91
Figura 57 - Croqui sistema de aquisição e monitoramento de dados.....	101
Figura 58 - Módulos de aquisição de dados.....	101
Figura 59 - Sistema elétrico do módulo 1.....	102
Figura 60 - Sistema elétrico do módulo 2.....	102
Figura 61 - Diagrama de blocos da programação.....	103
Figura 62 - Painel Frontal da Programação.....	103
Figura 63 - Diagrama de causas e efeitos com incertezas das medições consideradas nos cálculos.....	105
Figura 64 - Módulos e parâmetros individuais a serem utilizados nos cálculos do módulo 1. .....	105
Figura 65 - Módulos e parâmetros individuais a serem utilizados nos cálculos do módulo 2. .....	105
Figura 66 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e $I_{TIG}$ a 100 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.....	111
Figura 67 – Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e $I_{TIG}$ a 150 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.....	112
Figura 68 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e $I_{TIG}$ a 200 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.....	113
Figura 69 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e $I_{TIG}$ a 100 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.....	114
Figura 70 – Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e $I_{TIG}$ a 150 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.....	115
Figura 71 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e $I_{TIG}$ a 200 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem utilizados por pesquisadores TIG-MIG/MAG.....	39
Tabela 2 - Matriz experimental ordenada conforme realização dos experimentos. ....	48
Tabela 3 - Parâmetros mantidos constantes para os experimentos. ....	48
Tabela 4 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com MIG/MAG na polaridade direta. ....	50
Tabela 5 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com MIG/MAG na polaridade convencional.....	51
Tabela 6 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com TIG-MIG/MAG convencional com TIG a 50 A.....	52
Tabela 7 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com TIG-MIG/MAG convencional com TIG a 150 A.....	53
Tabela 8 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com TIG-MIG/MAG direto com TIG a 150 A. ....	54
Tabela 9 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com TIG-MIG/MAG direto com TIG a 50 A. ....	55
Tabela 10 - Resultados da análise macrográfica. ....	56
Tabela 11 - Imagens de secções transversais dos experimentos. Chapa com espessura de 6,35 mm.....	64
Tabela 12 - Imagens das superfícies das amostras. ....	64
Tabela 13 - Parâmetros utilizados nos experimentos.....	67
Tabela 14 - Matriz de planejamento de experimentos.....	67
Tabela 15 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com MIG/MAG convencional. ....	68
Tabela 16 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com MIG/MAG direta.....	69
Tabela 17 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com a $I_{TIG}$ a 50 A. ....	71
Tabela 18 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com $I_{TIG}$ a 50 A.....	73
Tabela 19 - Taxas de deposição, fusão e rendimentos dos experimentos. ....	77
Tabela 20 - Imagens das superfícies das amostras. ....	82

Tabela 21 - Imagens de secções transversais dos experimentos. Chapa com espessura de 6,35 mm.....	83
Tabela 22 - Resultados da análise metalográfica.....	84
Tabela 23 - Valores numéricos multiplicadores dos módulos.....	104
Tabela 24 - Classificação dos blocos segundo fontes de incertezas.....	106
Tabela 25 - Resultados de medição e incerteza do sistema relacionados aos dados de corrente. ....	107
Tabela 26 - Resultados de medição e incerteza do sistema relacionados aos dados de tensão do módulo 1. ....	108
Tabela 27 - Resultados de medição e incerteza do sistema relacionados aos dados de tensão do módulo 2. ....	108
Tabela 28 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com $I_{TIG}$ a 100 A.....	110
Tabela 29 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com $I_{TIG}$ a 150 A.....	111
Tabela 30 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com $I_{TIG}$ a 200 A.....	112
Tabela 31 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com $I_{TIG}$ a 100 A. ....	114
Tabela 32 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com $I_{TIG}$ a 150 A. ....	115
Tabela 33 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com $I_{TIG}$ a 200 A. ....	116
Tabela 34 - Valores referentes aos cálculos do Capítulo 6. ....	117
Tabela 35 - Medida 1 dos aspectos geométricos do Capítulo 7. ....	118
Tabela 36 - Medida 2 dos aspectos geométricos do Capítulo 7. ....	118

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\Omega$	Resistência (em ohms)
°	Graus
A	Ampere
Ar	Argônio
<b>AWS</b>	<i>American Welding Society</i>
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>CCEN</b>	Corrente Contínua com Eletrodo Negativo
<b>CCEP</b>	Corrente Contínua com Eletrodo Positivo
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>DAQ</b>	<i>Data Acquisition</i>
<b>DBCP</b>	Distância Bico de Contato à Peça
<b>GTAW</b>	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
He	Hélio
I <sub>TIG</sub>	Corrente TIG
l	Litros
<b>MAG</b>	<i>Metal Active Gas</i>
<b>MIG</b>	<i>Metal Inert Gas</i>
m	Metros
min	Minutos
mm	Milímetros
ms	Milisegundos
O	Oxigênio
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i>
s	Segundos
<b>TIG</b>	<i>Tungsten Inert Gas</i>
V	Volt

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>19</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> ..... <b>19</b>
1.1	Justificativa ..... 20
1.2	Objetivos ..... 21
1.2.1	<i>Objetivo geral</i> ..... 21
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i> ..... 21
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> ..... <b>23</b>
2.1	Processo de soldagem TIG ..... 23
2.1.1	<i>Vantagens e limitações do processo TIG</i> ..... 25
2.1.2	<i>Variáveis do processo TIG</i> ..... 25
2.2	Processo de soldagem MIG/MAG..... 27
2.2.1	<i>Vantagens e limitações do processo MIG/MAG</i> ..... 29
2.2.2	<i>Variáveis do processo MIG/MAG</i> ..... 30
2.3	Soldagem híbrida ..... 34
2.3.1	<i>Estudos realizados sobre o processo híbrido TIG-MIG/MAG</i> ..... 36
2.3.2	<i>Parâmetros de interesse da soldagem híbrida TIG-MIG/MAG</i> ..... 40
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> ..... <b>42</b>
3.1	Materiais e equipamentos..... 42
3.2	Projeto de experimentos..... 45
3.3	Características de geometria do cordão de solda ..... 46
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>ENSAIOS PRELIMINARES</b> ..... <b>47</b>
4.1	Procedimento experimental ..... 47
4.2	Resultados e discussões ..... 49
4.2.1	<i>Comportamento dos sinais elétricos</i> ..... 49
4.2.2	<i>Análise de geometria dos cordões</i> ..... 56
4.2.2.1	<i>Análise do reforço do cordão de solda</i> ..... 57
4.2.2.2	<i>Análise da penetração do cordão de solda</i> ..... 58
4.2.2.3	<i>Análise da largura do cordão de solda</i> ..... 60
4.2.2.4	<i>Análise da área fundida do cordão de solda</i> ..... 61

4.2.2.5	Análise do ângulo de contato do cordão de solda.....	62
4.2.2.6	Análise dos aspectos visuais dos cordões.....	63
4.3	Considerações finais .....	64
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>		<b>66</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE SINAIS ELÉTRICOS DE CORRENTE E TENSÃO</b>	<b>66</b>
5.1	Procedimento experimental .....	66
5.2	Resultados e discussões .....	68
5.2.1	<i>Processo MIG/MAG.....</i>	<i>68</i>
5.2.2	<i>Processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta</i> <i>70</i>	<i>70</i>
5.2.3	<i>Processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade</i> <i>convencional</i> <i>72</i>	<i>72</i>
5.2.4	<i>Análise de potência .....</i>	<i>74</i>
5.3	Considerações finais .....	75
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>		<b>76</b>
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DE CAPACIDADE PRODUTIVA .....</b>	<b>76</b>
6.1	Procedimento experimental .....	76
6.2	Resultados e discussões .....	77
6.2.1	<i>Taxa de deposição .....</i>	<i>77</i>
6.2.2	<i>Taxa de fusão.....</i>	<i>79</i>
6.2.3	<i>Rendimento de deposição .....</i>	<i>79</i>
6.3	Considerações finais .....	80
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>		<b>81</b>
<b>7</b>	<b>ANÁLISE GEOMETRIA DOS CORDÕES .....</b>	<b>81</b>
7.1	Procedimento experimental .....	81
7.2	Resultados e discussões .....	82
7.2.1	<i>Análise de aspectos visuais.....</i>	<i>82</i>
7.2.2	<i>Análise de variância .....</i>	<i>83</i>
7.2.3	<i>Análise das variáveis respostas.....</i>	<i>84</i>
7.2.3.1	Largura .....	85
7.2.3.2	Reforço.....	86
7.2.3.3	Penetração .....	87
7.2.3.4	Área Fundida.....	88
7.2.3.5	Ângulo de contato.....	90

7.3	Considerações finais .....	91
<b>CONCLUSÕES .....</b>		<b>93</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>		<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>96</b>
<b>APÊNDICE I - SISTEMA DE AQUISIÇÃO E MONITORAMENTO DE DADOS.....</b>		<b>100</b>
<b>APÊNDICE II – OSCILOGRAMAS E TABELAS REFERENTES AO CAPÍTULO 5 .....</b>		<b>110</b>
<b>APÊNDICE III – MEDIDAS REFERENTES AOS CÁLCULOS DO CAPÍTULO 6.....</b>		<b>117</b>
<b>APÊNDICE IV – MEDIDAS GEOMÉTRICAS REFERENTES AOS ENSAIOS DO CAPÍTULO 7 .....</b>		<b>118</b>

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Estudos relacionados à melhoria dos processos de soldagem podem proporcionar menores custos, melhor utilização dos recursos, maior qualidade nos produtos e menor tempo de fabricação. O avanço das tecnologias relacionadas ao aprimoramento de técnicas que influenciem diretamente a qualidade e produtividade da soldagem tem se mostrado de grande relevância para a indústria (MODENESI, 2012; LOCATELLI, 2007). Dentre as técnicas e metodologias que vem se aprimorando tem-se a soldagem híbrida, que consiste, segundo Schneider (2014), em um novo processo com características únicas, composto pela união de diferentes tipos de soldagem, operando concomitantemente em uma mesma zona, cada um exercendo influências sobre o outro. O autor ainda destaca que este tipo de processo é utilizado para satisfazer necessidades de união de determinados materiais quando os processos convencionais não se mostram aptos ou ainda, para melhorar aspectos relacionados à produtividade e qualidade.

A combinação de processos de soldagem já comumente utilizados no meio industrial tem sido uma alternativa na busca por melhores capacidades produtivas, alta qualidade dos cordões de solda produzidos e custo de operação reduzido. Estudos relacionados à sinergia entre dois processos de soldagem distintos, segundo Messler (2004), foram iniciados nos anos 70 e, desde então, pesquisadores buscam unir processos que gerem efeitos que os mesmos não conseguem obter individualmente. Assim, descobrindo melhores técnicas e procedimentos que tornem estes processos viáveis e aplicáveis para a indústria.

Os processos TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*), por sua vez, estão entre os processos mais utilizados pelo setor industrial, por se tratarem de alternativas de baixo custo de equipamentos, consumíveis e obterem alto rendimento dentro do processo produtivo em diversos tipos de solda e materiais. Estes dois processos também tem sido destaque quando utilizados em associação entre eles ou com

outros processos. A junção especificamente destes dois processos pode ser observada nos estudos de Kanemaru et al. (2015), Chen et al. (2017), Meng et al. (2014) e Teixeira (2011), que estudaram os processos TIG-MIG e/ou TIG-MAG.

Para Moreira (2008), os processos de soldagem podem apresentar limitações apesar dos avanços tecnológicos e um dos elementos fundamentais para alcançar uma boa qualidade do cordão de solda é a seleção correta de seus parâmetros. Em um processo híbrido estável TIG-MIG/MAG o arco TIG pode estabilizar o arco MIG/MAG e pré-aquecer o metal antes do arco MIG/MAG, aumentando assim a capacidade de espalhamento e a molhabilidade do metal fundido depositado sobre o metal de base (MENG et al., 2014). Teixeira (2011) cita que com a utilização de uma tocha TIG para pré aquecer o material de base gera diferença na geometria dos cordões de solda realizados, dependendo dos parâmetros de soldagem adotados.

Assim, este estudo abordará os processos de soldagem TIG e MIG/MAG, classificados pela *American Welding Society* (AWS) como pertencentes ao grupo “Soldagem a Arco”, em uma configuração associativa a fim de utilizar as vantagens que cada processo possui em relação à qualidade da solda. Tendo como finalidade avaliar os efeitos proporcionados pela associação de dois processos de soldagem convencionais na qualidade e geometria do cordão de solda obtido mostrando uma análise dos sinais elétricos de tensão e corrente e da capacidade produtiva do processo. A associação em questão se trata dos processos de soldagem convencionais TIG e MIG/MAG, que, operando em conjunto, resultam no processo TIG-MIG/MAG.

Para tanto, o trabalho está estruturado da seguinte maneira: como subtópicos do Capítulo 1 uma breve justificativa ressaltando a relevância do estudo e os objetivos geral e específico, a seguir no Capítulo 2 uma revisão da literatura caracterizando os processos utilizados, no Capítulo 3 a descrição do procedimento experimental utilizado em todo o desenvolvimento do estudo, no Capítulo 4 os resultados dos testes preliminares, no Capítulo 5 análise dos sinais dos experimentos finais, Capítulo 6 análise da capacidade produtiva, Capítulo 7 análise da geometria de soldagem, depois disto uma conclusão e, por fim, as referências utilizadas como base de conhecimento para a pesquisa.

## **1.1 Justificativa**

A contribuição científica deste estudo esta no fato de que o tema é atual e que foram encontradas poucas pesquisas relatadas sobre o tema mundialmente. Nas existentes não se encontra relacionados à polaridade nos processos e deixam lacunas em relação a alguns parâmetros como, comportamento dos sinais elétricos, influência de alguns parâmetros na solda final, aspectos que ao serem analisados podem melhorar o desempenho dos

processos. Este trabalho pode contribuir para um melhor entendimento das grandezas envolvidas no processo de formação da solda e sua influência na qualidade final do cordão, sendo um auxílio para o desenvolvimento de novas técnicas, procedimentos e equipamentos que melhorem a aplicabilidade do processo.

A contribuição deste estudo para a área de manufatura está na identificação de parâmetros que influenciam a geometria dos cordões de solda realizados pelo processo TIG-MIG/MAG em uma configuração não utilizada comumente. Com melhor conhecimento do processo pode-se tomar decisões relacionadas à: regulagens nos equipamentos, colocando-as de acordo com interesse de qualidade dos cordões; utilização de recursos, podendo-se garantir o máximo de aproveitamento dos mesmos para se produzir juntas dentro de especificações dimensionais desejadas, com melhores qualidades superficiais para as mais diversas aplicações. Como destaque para o processo, o mesmo pode ser implementado com equipamentos já utilizados para os processos convencionais MIG/MAG e TIG.

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo geral*

Este trabalho tem como objetivo geral analisar os efeitos proporcionados pela associação de dois processos de soldagem convencionais, TIG e MIG/MAG, na geometria do cordão de solda obtido, no comportamento dos sinais de tensão e corrente e na capacidade produtiva do processo. Isto será feito através da variação da intensidade de corrente da parte TIG e da polaridade da parte MIG/MAG do processo.

### *1.2.2 Objetivos específicos*

A fim de alcançar o objetivo geral têm-se os seguintes objetivos específicos para este trabalho:

- Montagem de bancada experimental para o processo TIG-MIG/MAG no Laboratório de Fabricação Mecânica da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão;
- Montagem de sistema de aquisição de dados funcional e capaz de adquirir os sinais elétricos de tensão e corrente do processo TIG-MIG/MAG no Laboratório de Fabricação Mecânica da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão;
- Identificar as faixas de parâmetros de corrente e tensão que são operacionais para o processo e que possam gerar influência na geometria do cordão de solda;

- Identificar como a polaridade do processo MIG/MAG modifica a geometria de solda resultante e atua sobre o comportamento dos sinais de tensão e corrente do processo TIG-MIG/MAG.
- Identificar como a intensidade de corrente TIG influencia no comportamento dos sinais de tensão e corrente de soldagem e na geometria de solda resultante do processo TIG-MIG/MAG.
- Comparar os cordões de solda obtidos pelo processo associativo a aqueles obtidos pelo processo convencional MIG/MAG, através de sua geometria utilizando métodos estatísticos.
- Analisar dados relacionados à capacidade produtiva dos cordões produzidos pelo processo TIG-MIG/MAG com relação à variação da polaridade MIG/MAG.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

Uma vez que o processo TIG-MIG/MAG surge da associação de dois processos convencionais, este referencial tem a finalidade de primeiramente apresentar conceitos e pontos relevantes de cada um destes processos individualmente. Posteriormente, apresentar o processo híbrido e os principais estudos encontrados sobre o mesmo, apresentando alguns parâmetros de interesse que foram utilizados em outros estudos, principalmente os relacionados à geometria do cordão de solda.

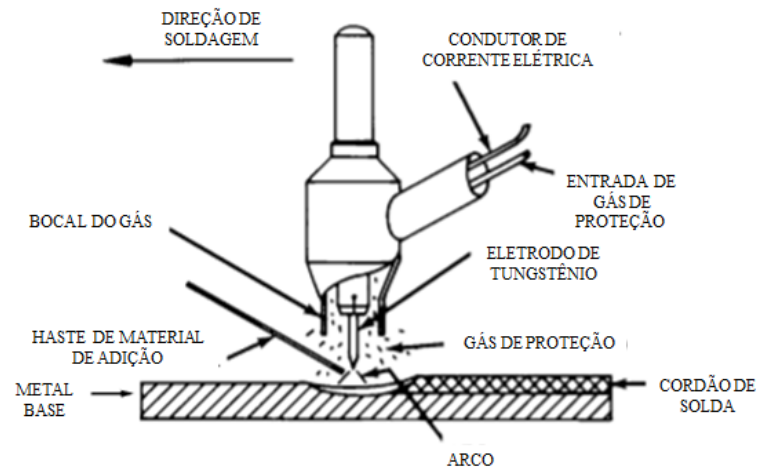
#### 2.1 Processo de soldagem TIG

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (TIG - *Tungsten Inert Gas* ou GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*) é caracterizada por Marques, Modenesi, Bracarense (2009) como:

Processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a unir. A proteção da poça de fusão e do arco contra contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes. (p. 205).

Neste processo as peças e/ou metais a serem unidos são fundidos pelo calor de um arco elétrico formado entre o eletrodo e a peça de trabalho dentro de uma redoma de gás inerte, que envolve o arco e impede a oxidação indevida do metal (MUSCASTER, 1991). Podendo ser efetuado de maneira autógena (sem material de adição) ou este sendo adicionado diretamente na poça de fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009) e ser realizado de maneira manual ou automatizada. Uma ilustração de operação deste processo pode ser observada na Figura 1.

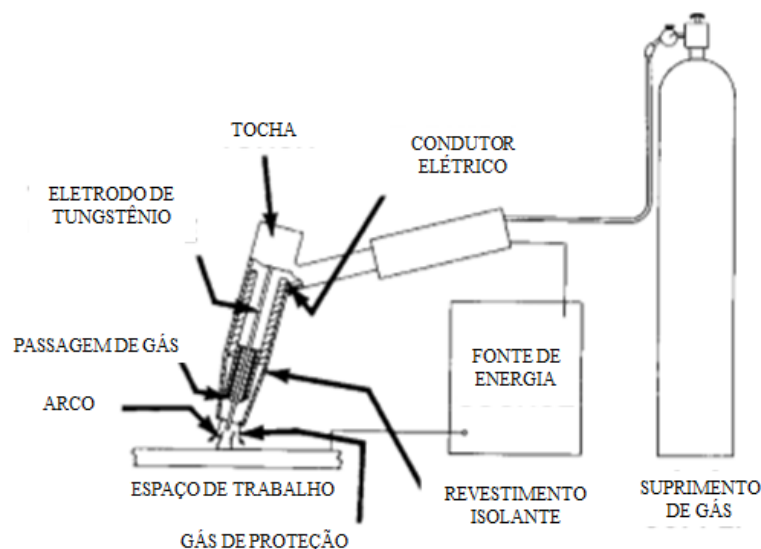
Figura 1 - Sistema esquemático de operação GTAW.



Fonte: (Adaptado de AWS, 2004)

Os equipamentos utilizados na realização de uma soldagem TIG consistem em uma fonte de energia, um cilindro de gás de proteção, uma tocha de soldagem, cabos, mangueiras e um dispositivo de abertura do arco de soldagem, podendo conter vários equipamentos auxiliares com o intuito de melhorar o controle do processo, gerar maior produtividade, facilitar a operação entre outros (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Uma ilustração destes equipamentos pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Equipamentos utilizados no processo TIG.



Fonte: (Adaptado de AWS, 2004)

### 2.1.1 *Vantagens e limitações do processo TIG*

O processo de soldagem TIG tem como principal vantagem a alta qualidade de soldagem (Kanemaru et al., 2013), podendo assim ser utilizado em uma gama de aplicações onde esta característica é requerida, como nas indústrias aeroespacial, nuclear, soldagens autógenas de alta velocidade e soldas típicas de oficinas de fabricação e reparo, as soldas podem ser feitas em quaisquer posições e em quase todos os tipos de metais (AWS, 2004).

Outra vantagem é a flexibilidade do processo podendo ser obtida pelo fato de permitir o controle independente da fonte de calor e da adição de material de enchimento (TOKAR, 2011). O processo pode ser automatizado e programado para prover preciso controle de variáveis, este controle podendo ser realizado remotamente. O processo apresenta adequado controle da manutenção da penetração da solda de passagem da raiz, sendo apto para a produção de soldas autógenas de qualidade superior em altas velocidades, sem respingos e geralmente com poucos defeitos. E por fim tem o benefício de se poder utilizar fontes de energia relativamente baratas (AWS, 2004).

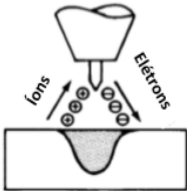
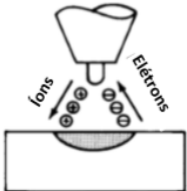
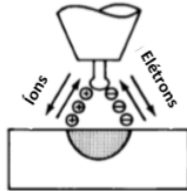
Como limitações, tem-se que o processo geralmente apresenta uma menor capacidade de deposição de material se comparado a processos que utilizam eletrodos consumíveis, limitações quanto à máxima espessura soldável, em alguns tipos de junta (MODENESI, 2013). Também apresenta baixa tolerância para contaminantes no material de enchimento e base, necessita de maior habilidade do soldador quando operada manualmente se comparado com outros processos. Dependendo do ambiente (com correntes de ar ou ventos) se torna difícil à proteção da zona de solda de maneira adequada e, por fim, os campos magnéticos podem provocar a deflexão do arco, como acontece com outros processos de arco, que podem dificultar o controle da soldagem (AWS, 2004).

### 2.1.2 *Variáveis do processo TIG*

A corrente de soldagem é a variável que controla a penetração da solda (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009) e a largura do cordão sendo seu efeito diretamente proporcional. O reforço do cordão quando se solda com material de adição, quando outros parâmetros constantes, tem propensão a diminuir com o aumento da corrente (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Com o aumento da corrente há a tendência do aumento da tensão se utilizado um comprimento de arco fixo. Esta pode ser utilizada tanto em corrente contínua (CC) quanto em corrente alternada (CA), sendo delimitada pelo material a ser soldado (AWS, 2004), porém é mais usual se utilizar a corrente contínua com polaridade negativa (TEIXEIRA, 2011).

A polaridade da corrente influencia a penetração e a distribuição de calor entre eletrodo e a peça. Podem ser utilizados três tipos de configuração de polaridade. Para CC e polaridade negativa obtém-se maior penetração e maior velocidade pelo fato do calor gerado estar localizado 30% no eletrodo e 70% na peça a ser soldada, fato que para a CC e polaridade positiva se inverte sendo 70% do calor gerado no eletrodo e 30% na peça, o que gera uma poça de fusão rasa e larga e uma menor penetração. Na configuração de CA ocorre uma ação de limpeza de óxidos refratários superficiais chamados *sputtering* e o calor gerado é distribuído de forma intermediária (TEIXEIRA, 2011), podendo ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Características dos tipos de corrente no processo TIG.

Tipo de Corrente	Contínua	Contínua	Alternada (Balanceada)
Polaridade do Eletrodo	Negativa	Positiva	
Fluxo de eletrons e ions			
Características de penetração			
Ação Limpeza de Oxidos	Não	Sim	Sim (Meio Ciclo)
Balanco de Calor no arco (aprox.)	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo
Penetração	Profunda e Estreita	Rasa e larga	Média

Fonte: (Adaptado de AWS, 2004)

A tensão do arco de soldagem TIG controla o comprimento do arco (distância entre a ponta do eletrodo e a peça de trabalho), este influencia a largura do cordão de solda proporcionalmente e, em menor grau, a penetração e proteção do arco. A tensão é uma variável que pode ser afetada por alguns outros fatores sendo eles: distância entre eletrodo e peça de trabalho, corrente de soldagem, tipo de gás de proteção, forma da ponta do eletrodo e pressão do ar ambiente. Os efeitos destas variáveis podem ser vistos com maior clareza em baixas correntes de soldagem (abaixo de 75 A (amperes)) (AWS, 2004). Ao se usar grandes comprimentos de arcos ou pequenos comprimentos, há a tendência de se mostrarem instáveis. Define-se então, que o comprimento do arco não deve ultrapassar um valor de 1,5 vezes o diâmetro do eletrodo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Outro fator que altera a largura e penetração de soldagem TIG é a velocidade de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), quanto maior a velocidade menor a largura, penetração do cordão, energia de soldagem e reforço do cordão (em casos com adição de metal). Portanto quanto maior a velocidade de soldagem melhor a produtividade e eficiência do processo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Ao se trabalhar com solda utilizando material de adição tem-se também de se controlar a velocidade de alimentação do arame, pois esta influencia o número de passes necessários e a aparência da solda acabada. Alimentar o arame muito devagar pode originar cordões de solda mais côncavos, tornando o corte inferior incompleto e gerando grande potencial de rachaduras na linha central. O aumento da velocidade de alimentação do arame gera um cordão de solda mais convexo, porém pode diminuir a penetração da solda (AWS, 2004).

A vazão do gás de proteção é um quesito que influencia a qualidade do cordão de solda, uma vez que se esta for muito alta pode causar turbulência no fluxo de gás que pode aspirar a contaminação atmosférica para a poça de fusão, além de possuir alto custo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), e se for muito baixa leva a uma falta de proteção que pode gerar oxidação do cordão e formação de porosidades (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Para a escolha da melhor vazão de gás se considera o tamanho do bico de gás, o tamanho do conjunto de solda e o movimento do ar. Normalmente, a vazão é proporcional à área de seção transversal do bocal, sendo assim a escolha do diâmetro do bocal de gás é feita com o intuito de se adequar ao tamanho da poça de fusão e à reatividade do metal a ser soldado (AWS, 2004).

Os eletrodos não consumíveis mais utilizados para a soldagem TIG em corrente contínua são os eletrodos de tungstênio com óxido de tório, lantânio ou cério por não formarem na ponta do eletrodo uma ponta em ângulo e não uma semiesfera. O diâmetro destes é proporcional a corrente de soldagem, sendo que para correntes maiores, maiores diâmetros (TEIXEIRA, 2011). A forma da ponta do eletrodo também se mostra como uma variável importante pois as várias geometrias da ponta do eletrodo afetam a forma e tamanho do cordão de solda, conforme o ângulo agudo aumenta, a penetração da solda aumenta, a largura do cordão de solda diminui (TEIXEIRA, 2011) e também exerce influência na formação de defeitos (do tipo cavidades) no fundo do cordão (TOKAR; PONOMAROV, 2015).

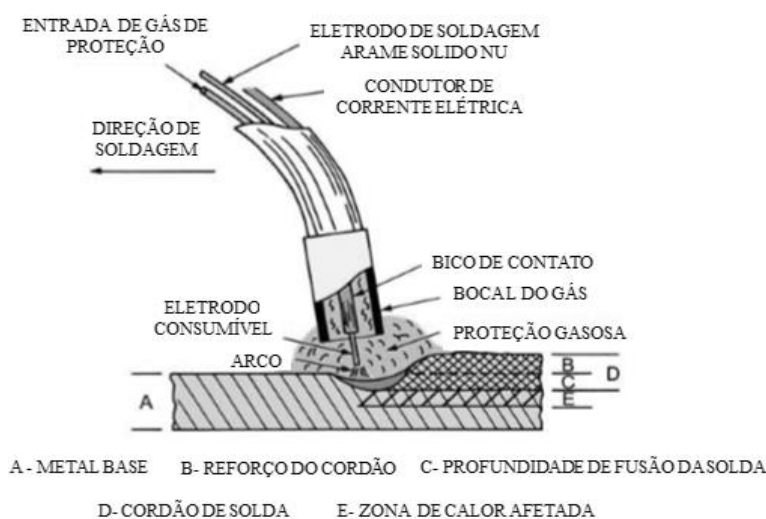
## **2.2 Processo de soldagem MIG/MAG**

MIG/MAG é a sigla para *Metal Inert Gas / Metal Active Gas*, conhecidos também pela sigla GMAW - *Gas Metal Arc Welding* - soldagem a arco com proteção gasosa. Neste processo as peças metálicas são unidas através de seu aquecimento realizado por um arco elétrico entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. Toda a área da poça de fusão é protegida dos gases da atmosfera por um gás ou mistura de gases, podendo estes serem gases inertes (MIG), gases ativos (MAG) e/ou misturas destes (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p. 233). Os gases inertes não reagem

metalurgicamente com a gota metálica ou com a poça de fusão, atuando apenas na proteção destas regiões, auxiliando na formação e manutenção e do arco voltaico e melhorando a molhabilidade nas ligas ferrosas. Já os gases ativos, além das funções acima citadas, reagem metalurgicamente com a gota e com a poça de fusão.

A união de peças é realizada através de diferentes modos de transferência em diferentes níveis de correntes (BARRA, 2003). A Figura 4 ilustra esquematicamente um processo de soldagem MIG/MAG.

Figura 4 - Processo esquemático de soldagem MIG/MAG.

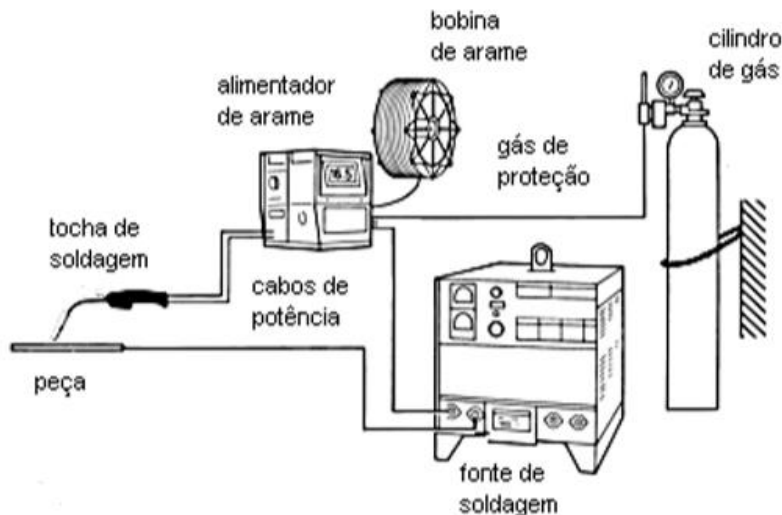


Fonte: (Adaptado de AWS, 2004)

O processo pode ser realizado de maneira semi-automática ou automatizadas e é operacional em todas as posições de acordo com a correta combinação de gás de proteção, eletrodos e variáveis de soldagem para os metais comercialmente importantes, aço ao carbono, aço de baixa liga de alta resistência, aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel (AWS, 2004).

A Figura 5 ilustra os equipamentos utilizados no processo de soldagem MIG/MAG, sendo eles segundo Marques, Modenesi e Bracarenses (2009), uma fonte de energia, o alimentador de arame, a tocha de soldagem, a fonte de gás protetor, cabos de potência e mangueiras.

Figura 5 - Equipamentos utilizados no processo MIG/MAG.



Fonte: (GOHR JR, 2002)

### 2.2.1 Vantagens e limitações do processo MIG/MAG

Um dos processos de soldagem mais utilizados industrialmente o MIG/MAG pode proporcionar alta produtividade e eficiência a um baixo custo (MENG et al, 2014), ele apresenta uma maior agilidade com relação a outros processos de soldagem e podem ser utilizados em uma vasta gama de metais e espessuras, diferentes modos de fabricação e condições para soldagem em todas as posições.

A AWS (2004) define como principais vantagens do processo: taxas de deposição significativamente maiores do que as obtidas se comparados a outros processos de soldagem, velocidades de soldagem maiores do que as alcançadas em outros processos, devido à alimentação contínua do eletrodo e maiores taxas de deposição de metal de enchimento.

Podem ser realizadas soldas longas, sem paradas e arranques intermediários por ser utilizado eletrodo (alimentação de arame) contínuo, possibilita uma penetração mais profunda (quando a transferência por pulverização é usada), devido à ausência de escória pesada é necessária uma mínima limpeza pós-solda, o processo mantém baixo teor de hidrogênio, tornando-o uma boa escolha para materiais de soldagem suscetíveis à fragilização por hidrogênio e por fim, as habilidades do processo são rapidamente ensinadas e adquiridas (AWS, 2004).




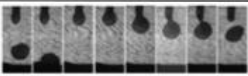

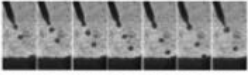
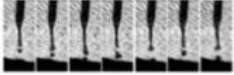


Como limitações ressalta-se alguns pontos como: o equipamento é mais complexo, caro e menos portátil, uma vez que a pistola de soldagem é maior e a pistola de solda deve estar próxima à junta para garantir que o metal de solda esteja adequadamente protegido, assim dificultando sua utilização em locais de difícil acesso; para a utilização em locais externos deve se colocar proteções na área de soldagem com o intuito de não dispersar o gás de proteção; pelo fato de irradiar níveis relativamente altos de calor e intensidade de arco, pode haver resistência por parte dos operadores em operar o processo (AWS, 2004); a abertura do arco voltaico nesta modalidade também é um fator crítico, uma vez que o metal de base e o arame (eletrodo) ainda se encontram em baixas temperaturas dificultando a emissividade e deixando o processo suscetível a instabilidades (LOCATELLI, 2007); e por fim o processo apresenta maior sensibilidade relacionada à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, levando a um criterioso ajuste dos parâmetros a fim de obter a solda desejada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

### 2.2.2 Variáveis do processo MIG/MAG

Para a formação do arco é realizado o contato (curto-circuito) entre o arame-eletrodo e a peça, gerando assim a passagem de uma corrente elevada que aquece o arame-eletrodo e a peça e leva a fusão de alguma parte do eletrodo estabelecendo então o arco. Para evitar uma abertura de arco conturbada é necessário que a ponta do arame tenha a forma pontiaguda para que o arco se origine na região de contato (GOHR, JR, 2002).

Após a formação do arco a alimentação de arame é ministrada continuamente transformando em gotas de metal fundido e as transferindo para a peça gerando o cordão de solda. A transferência metálica é o fator que garante a qualidade, produtividade e repetibilidade de solda e é controlada pela velocidade de arame e sua fusão. Esta é resultante de um conjunto de forças (eletromagnética, gravitacional e tensão superficial) e de acordo com a adoção de diferentes valores de corrente e tensão de arco, da composição química do eletrodo e da peça, e do gás de proteção do arco (inerte ou ativo) tem-se diversas maneiras de transferência metálica (GOHR, JR, 2002), que são observadas na Figura 06.

Figura 6 - Modos naturais de transferência metálica em soldagem MIG/MAG.

Classe de transferência	Modo de transferência	Aparência (Imagem)	Força (efeito) governante principal
Transferência por contato	Curto-Circuito		Tensão superficial e efeito de pinça eletromagnética
	Transferência por Ponte		Tensão superficial
	Curto-Circuito Forçado		Efeito de pinça eletromagnética fortemente pronunciado
Transferência por Vão-Livre	Globular		Força gravitacional e forças repulsivas
	Globular Repulsiva		Força gravitacional
	Spray Projetado		Força eletromagnética
	Spray com alongamento		Força eletromagnética
	Spray Rotacional		Força eletromagnética
	Explosiva		Força eletromagnética e reações químicas

Fonte: (Adaptado de SCOTTI; PONOMAREV; LUCAS, 2012)

Dentre as variáveis de soldagem MIG/MAG Teixeira (2011) classifica dois grupos: variáveis ajustáveis primárias, que abrange a corrente, tensão e velocidade de soldagem, e variáveis ajustáveis secundárias, que compreende a extensão do arame-eletrodo após o bico de contato e o ângulo de deslocamento da tocha de soldagem. Além destas deve-se também ajustar algumas variáveis pré-selecionadas, sendo elas, diâmetro do eletrodo, tipo e vazão do gás de proteção, que são dimensionadas de acordo com o tipo de metal base, dos materiais consumíveis e da junta a ser realizada.

Com relação às variáveis pré-selecionadas, a escolha do diâmetro do arame-eletrodo deve ser realizada para contemplar a espessura do material de base, da taxa de deposição, penetração e geometria de cordão requerida e da posição de soldagem (TEIXEIRA, 2011). Quanto maior o diâmetro do eletrodo maior a corrente suportada e assim maior a penetração e taxa de fusão (TEIXEIRA, 2011).

Os tipos de gás de proteção mais utilizados neste processo são argônio (Ar), em alguns casos, hélio (He) (gases inertes) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (gás ativo), podendo ser

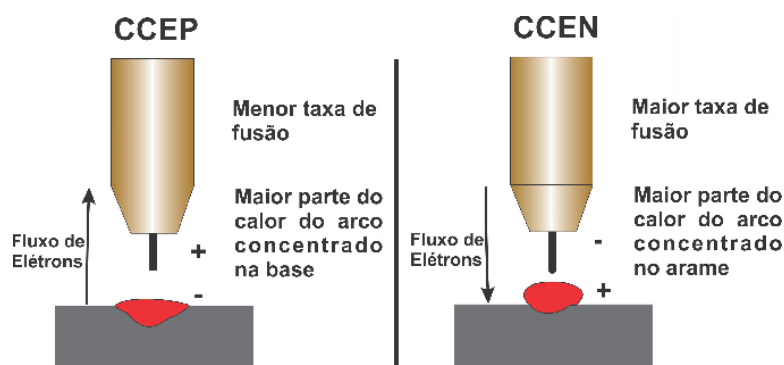
utilizados puros, em combinações ou misturados com outros gases (FORTES, 2005). O tipo de gás de proteção exerce influencia na penetração, largura, velocidade máxima de soldagem, tendência de mordedura, custo de operação do processo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), modo de transferência do metal, propriedades mecânico metalúrgicas da junta, geometria e aparência da junta e na estabilidade do arco elétrico (TEIXEIRA, 2011).

A vazão de gás de proteção correta é aquela que possibilite cobertura hábil contra a contaminação do arco e da solda pela atmosfera. O uso de vazões muito pequenas pode ocasionar o aparecimento de porosidade e problemas relacionados à falta de proteção, já o uso de vazões muito altas elevam o custo da operação e podem gerar depressões na poça de fusão tornando o cordão irregular (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

No grupo de variáveis ajustáveis primárias a corrente de soldagem MIG/MAG exerce influencia na penetração de solda, quanto maior a corrente, aumentando relativamente a velocidade de soldagem, maior a penetração (AWS, 2004). A corrente se relaciona diretamente com a velocidade de alimentação do arame (desde que a extensão do eletrodo seja constante), quando há um aumento (ou diminuição) na velocidade de alimentação do arame leva também a um aumento (ou diminuição) da corrente de soldagem (FORTES, 2005).

A polaridade mais utilizada para soldagens MIG/MAG é de corrente contínua com eletrodo positivo (CCEP), pois gera estabilidade do arco, transferência suave em diversos modos de transferência metálica, relativamente poucos respingos, cordões com melhores características e alta penetração em uma maior faixa de correntes, nesta polaridade 30% do calor é usado no aquecimento do eletrodo e 70% é entregue a peça de trabalho (TALKINGTON, 1998). Enquanto que ao se utilizar corrente contínua com eletrodo negativo (CCEN) observa-se alta taxa de fusão de arame para certas correntes se comparado a CCEP, menor calor transferido à peça, 30% para peça e 70% para aquecimento do eletrodo (TALKINGTON, 1998), porém com pouca penetração e alta quantidade de respingos (SOUZA, RESENDE, SCOTTI, 2009). Algumas características do cordão de solda em cada polaridade podem ser observadas na Figura 7.

Figura 7 - Características do cordão de solda em CCEP (inversa) e CCEN (direta).



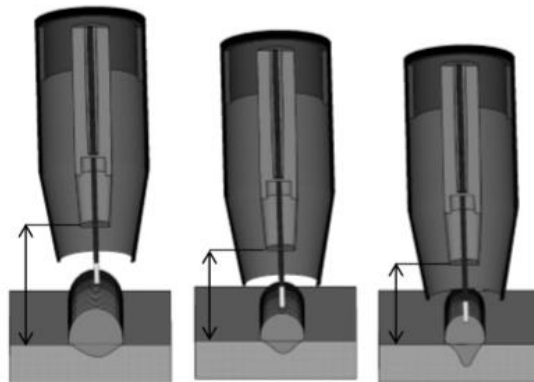
Fonte: (Adaptado de TALKINGTON, 1998)

A tensão de soldagem MIG/MAG é o fator que regula o comprimento do arco de soldagem, esta relacionada à corrente de soldagem e afeta o modo de transferência metálica e o formato do cordão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), quando há um aumento da tensão do arco (mantida corrente constante) observa-se aumento da largura do cordão e uma redução da altura (ou reforço) e da penetração (TORRES, 2013). Ao se utilizar tensões de soldagem muito altas podem surgir condições de respingos pesados e em tensões muito baixas criam-se depressões no centro do reforço (AWS, 2004).

A velocidade de soldagem é definida como a velocidade linear de deslocamento do arco ao longo da junta soldada. Esta por sua vez influencia diretamente a energia de soldagem que pode alterar o grau de penetração, a largura e geometria do cordão (TORRES, 2013). Em velocidades de soldagem muito altas observa-se menor penetração, reforço e largura do cordão além do surgimento de mordeduras, falta de fusão e de penetração do cordão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Para velocidades muito baixas tem-se um custo maior, problemas metalúrgicos relacionados à alta energia de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), redução da penetração efetiva pelo fato do arco atuar com mais intensidade na poça de solda do que no metal de base e a produção de um cordão mais largo (TORRES, 2013).

Para as variáveis ajustáveis secundárias tem-se a extensão do eletrodo (*stick-out*) que é a distância entre o último ponto de contato elétrico, geralmente a extremidade do bico de contato, e a peça de trabalho (DBCP), esta variável influencia a corrente requerida para a fusão do arame em determinada velocidade de soldagem. Grandes extensões de eletrodo levam a um excesso de metal de solda sendo depositado com baixo calor do arco que resulta em uma geometria adversa do cordão, baixa penetração e menos estabilidade do arco (FORTES, 2005). O efeito das diferentes extensões do eletrodo sobre a geometria do cordão de solda pode ser observado na Figura 8.

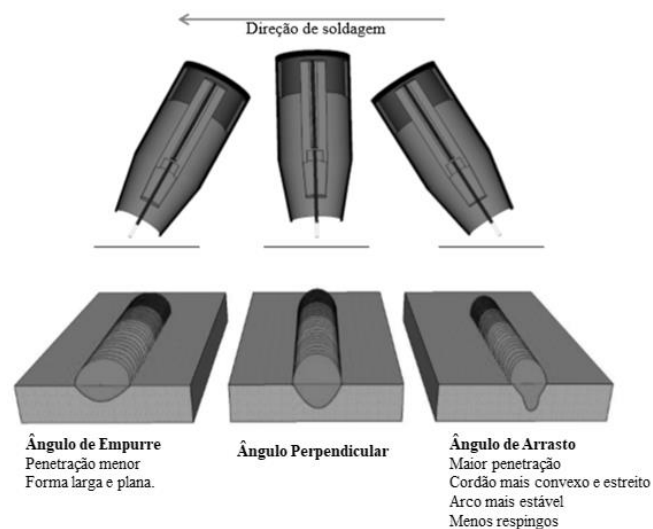
Figura 8 - Efeito das diferentes extensões de eletrodo na geometria do cordão.



Fonte: (TORRES, 2013)

A orientação do eletrodo relacionada à união é um fator que afeta a forma e penetração do cordão e pode ser descrita de duas maneiras: pelo ângulo de trabalho, ângulo entre o eixo do eletrodo e a superfície adjacente da peça de trabalho, e pelo ângulo de deslocamento, relação do eixo do eletrodo com a direção do deslocamento. O ângulo de trabalho geralmente utilizado para juntas de topo em posição plana é de  $90^\circ$  e para juntas de filete  $45^\circ$ . Os ângulos de deslocamento e comumente utilizados são: ângulo de empurre, quando o eletrodo aponta na direção da deslocação, ângulo perpendicular, o eletrodo posiciona-se perpendicularmente, e ângulo de arrasto, quando o eletrodo aponta na direção oposta à direção da deslocação, cada um resultando em específicas características de cordão de solda (TORRES, 2013) que podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9 - Efeito da posição do eletrodo e ângulo de deslocamento sobre o cordão.

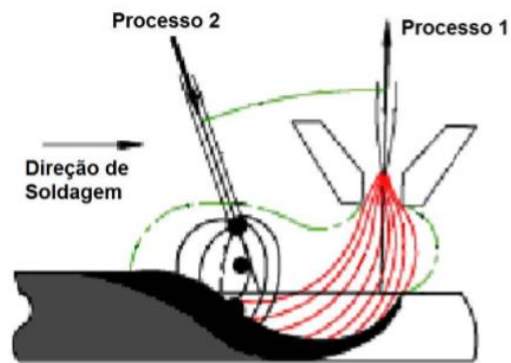


Fonte: (Adaptado de TORRES, 2013)

### 2.3 Soldagem híbrida

Processo híbrido de soldagem é definido por Rayes, Walz e Sepold (2004) como a união de dois processos resultando em outro, original, com suas características e características próprias, aumentando suas áreas de aplicação e capacidades, através da otimização da interação mútua entre as duas fontes de energia. A Figura 10 ilustra um processo de soldagem híbrida.

Figura 10 - Processo de soldagem híbrida.



Fonte: (Adaptado de DYKHNO,DAVIS, 2006)

Messler (2004) apresenta um breve histórico da evolução de processos de soldagem híbrida no decorrer dos anos:

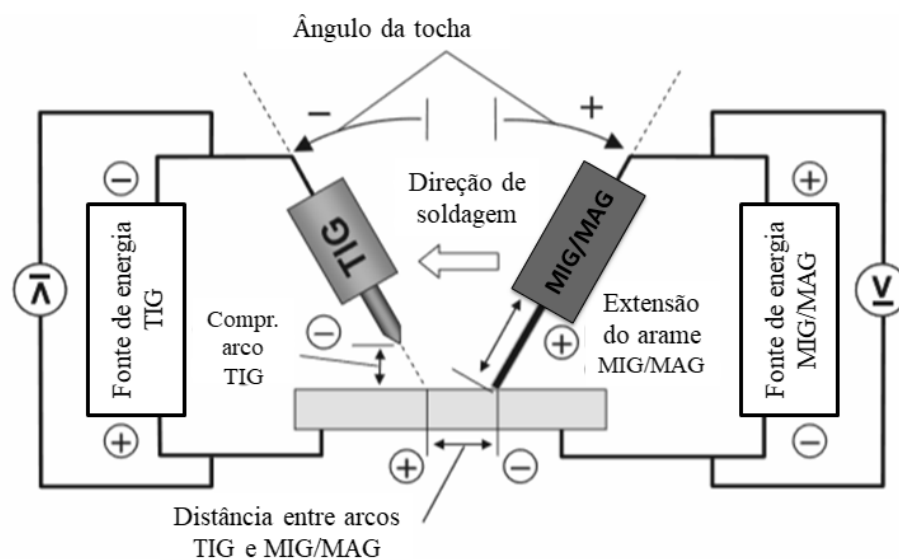
- 1972 – Processo de soldagem plasma com MIG/MAG;
- 1978 – Soldagem com duplo feixe de elétrons;
- 1979 – Processo de soldagem LASER com TIG;
- 1987 – Soldagem com duplo feixe de LASER;
- 1988 – Processo de soldagem LASER com TIG ou com MIG/MAG;
- 1991 – Processo de soldagem LASER com MIG;
- 1998 – Processo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

O estudo de Reutzel, Sullivan e Mikesic (2006), cita que os processos híbridos têm migrado de laboratórios para linhas de produção industrial, podendo reduzir custos e aumentar a produtividade e a qualidade de processos de soldagem.

### 2.3.1 Estudos realizados sobre o processo híbrido TIG-MIG/MAG

Entre os diversos estudos de soldagens híbridas realizados o processo de soldagem TIG-MIG/MAG se mostra como uma maneira eficaz de melhorar a produtividade e a qualidade da soldagem devido às vantagens dos dois processos, podendo assim obter maior controle sobre a geometria do cordão de solda por meio do processo TIG que utiliza eletrodo permanente e da maior produtividade advinda do processo MIG/MAG onde se tem eletrodo consumível (CHEN; WU; CHEN, 2014; TEIXEIRA, 2011). A Figura 11 mostra um desenho esquemático de um processo híbrido de soldagem TIG-MIG/MAG.

Figura 11 - Modelo esquemático de soldagem TIG-MIG/MAG.



Fonte: (Adaptado de KANEMARU et al., 2012).

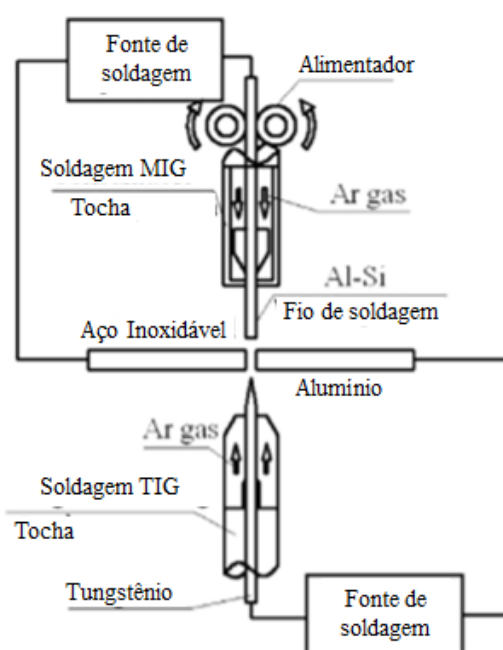
Meng et al. (2014) e Chen, Wu e Chen (2014) desenvolveram estudos sobre velocidade de soldagem através do processo TIG-MIG e concluíram que este sistema pode gerar um aumento significativo na velocidade de soldagem, se comparado com os processos individuais, gerando cordões de alta qualidade de aparência de solda, alta resistência à tração, micro-dureza, menor zona de calor afetada e efeito de força do arco de liderança na poça de fusão de solda.

O trabalho de Chen et al. (2017) utiliza duas diferentes formas do processo híbrido, primeiramente com a tocha TIG liderando o processo (TIG+MIG) e depois com a tocha

MIG/MAG liderando o processo (MIG+TIG) e comparando os resultados com o processo convencional MIG, seus resultados mostram que o processo híbrido TIG+MIG melhora a aparência da solda nos parâmetros utilizados, gerando cordões de solda com menores quantidades de respingos e mordeduras. Também constataram que o arco MIG é estabilizado por um arco TIG, descentralizando a força do arco MIG e reduzindo o impacto das gotas., além de demonstrarem através do estudo dos sinais de tensão e corrente que o arco TIG na liderança auxilia na estabilidade do arco e facilita a transferência metálica.

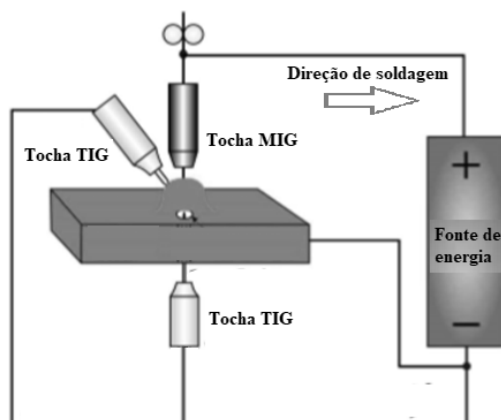
Zhang et al. (2016; 2017) estudaram o processo MIG-TIG de dupla face, este processo possui uma configuração diferente, onde as tochas TIG e MIG são colocadas verticalmente em ambos os lados da junta, conforme a Figura 12, o processo foi utilizado para juntas de topo em diferentes ligas de metais. Os autores citam que o processo híbrido se mostrou adequado por produzir proteção dos dois lados da junta, manter limpas as juntas durante a soldagem, pelo fato de ambos os lados da junta receberem calor ao mesmo tempo, a entrada de calor é redistribuída, se comparado com o processo convencional, se tornando menor e mais uniforme, que pode levar a diminuição e/ou eliminação da tensão residual na junta e controlar a formação de compostos intermetálicos frágeis mais adequadamente. Miao et al. (2015) também utilizaram o processo de MIG-TIG de dupla face porém com a adição de mais uma tocha TIG, conforme Figura 13, a adição desta corrente auxiliar possibilitou o aumento da fusão de arame, a redução da entrada de calor no metal base e modificou a transferência metálica de curto circuito para globular.

Figura 12 - Modelo esquemático de soldagem MIG-TIG de dupla face.



Fonte: (Adaptado de ZHANG et al., 2016)

Figura 13 - Modelo esquemático de soldagem MIG-TIG de dupla face com tocha auxiliar.



Fonte: (Adaptado de MIAO et al., 2015)

Ding et al. (2015) desenvolveram um equipamento para soldagem TIG-MIG que utiliza somente uma fonte de soldagem e o aplicaram para soldagem de ligas de magnésio e aço inoxidável, o processo, para estes materiais, provou amplo potencial por demonstrar alta eficiência, baixo custo, uma solda sem poros ou respingos e sua resistência melhorada nas camadas intermediárias de fusão, podendo ser empregado em diversas aplicações.

Os estudos realizados por Teixeira (2011) e Schneider (2017) buscaram analisar a influência de certos parâmetros da soldagem híbrida TIG-MIG/MAG sobre a geometria do cordão de solda resultante. Em suas análises concluíram que a variação de certos parâmetros podem afetar a geometria de solda resultante, possibilitando a otimização do processo. Podendo então gerar cordões de solda com maiores médias de área, penetração e largura do cordão porém menores médias de reforço que o processo MAG convencional.

Kanemaru et al. (2012, 2013, 2014, 2015) investigaram a influência das correntes de soldagem para uma melhor estabilidade do processo TIG-MIG/MAG, para tanto os parâmetros utilizados como base nos experimentos foram, intensidade de corrente TIG, intensidade de corrente MIG/MAG, ângulo entre tochas e distância entre os arcos. Seus resultados mostraram que em certos níveis dos parâmetros analisados pode-se obter estabilidade no processo, sem repulsa entre os arcos, e aumentar a qualidade da solda resultante.

Na Tabela 1 a seguir observam-se parâmetros de soldagem utilizados por pesquisadores do processo híbrido TIG-MIG/MAG.

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem utilizados por pesquisadores TIG-MIG/MAG.

		AUTORES											
		TEIXEIRA (2011)	CHEN et al. (2017)	ZHANG et al. (2016)	ZHANG et al. (2017)	KANEMARU et al. (2014)	KANEMARU et al. (2015)	MENG et al. (2014)	KANEMARU et al. (2013)	CHEN, WU; CHEN (2014)	SCHNIEDE R (2014)	DING et al. (2015)	MISHIMA et al. (2013)
Corrente (A)	MIG/MAG	140 / 160 / 190	250	-	75	270 / 280	270	210	290	150	-	-	270
	TIG	150 / 200 / 250	50	20 / 40	80	150-500	200*400	315 / 295 / 275 / 255	300-500	125	150 / 175 / 200	134	300
Tensão (V)	MIG/MAG	26 / 29 / 32	30	13 / 15	13	-	-	-	-	20,1	25 / 27,5 / 30	15,2	
	TIG	-	-	-	-	-	-	-	-	13,5	-	-	
Ângulo da Tocha (°)	MIG/MAG	0	0	0	0	- 15 / - 30	-45	- 5 / -10 / -15 / -20	- 30 / -50	90	90	120	60 / 45 / 30
	TIG	0	30	0	0	30	0	5 / 10 / 15 / 20	0	60	45	45	90 / 120
Polaridad e	MIG/MAG	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP	CCEP
	TIG	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN	CCEN
Tocha liderando processo		TIG	TIG / MIG	-	TIG	TIG	TIG	TIG	TIG	MIG	TIG	MIG	TIG
Distância bico de contato - peça (mm)		20	20	10	-	25	25	-	25	10	20	18	25
Distância eletrodo- peça (mm)		2 / 2,5 / 3	5	4	-	5	6	2 / 4 / 6 / 8	5	5	3	3	5
Ângulo de ponta do eletrodo (°)		45	-	-	-	30	30	-	30	-	60	-	30
Alimentação do arame (m/min)		6 / 6,5 / 7	7,8	5,8/ 6,8	-	10 / 11	2	-	9,5 - 11	-	7 / 8 / 9	-	8
Diâmetro do Bocal (mm)		15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Velocidade de soldagem (cm/min)		27 / 30 / 33	100 / 150	20/ 40	90	30	30	200-350	30-40	60	60 / 75 / 90	180	30
Distância entre tochas (mm)		30 / 40 / 50	5	0	1	4	4	10 / 12 / 14 / 16	4	10		-	4
Gás Utilizado	MIG/MAG	CO <sub>2</sub>	Ar	Ar	Ar	Ar+O <sub>2</sub> / Ar / Ar+O <sub>2</sub>	Ar	Ar	Ar	-	Ar/ CO <sub>2</sub> +Ar/ CO <sub>2</sub>	-	-
	TIG	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	-	Ar	Ar	-
Vazão gás (l/min)	MIG/MAG	15	20	15	-	-	-	19	-	-	12,5	15	-
	TIG	12	20	15	-	-	-	9,5	-	-	10 / 12,5 / 15	-	-
Material base		Aço carbono 1010 L= 6,3mm	Aço carbono L= 5mm	Alumínio 1060 / Aço inoxidável 304 L= 2mm	5A06 / Ti6Al4V esp. 3mm	Aço inoxidável 304 L= 12mm e 6mm	Aço inoxidável 304 L= 12mm	Aço macio L= 2,5mm e 2 mm	Aço inoxidável 304 L= 6mm	-	Aço carbono 1045 L= 7,94mm	Liga de Magnésio / Aço inoxidável 430 L= 3 e 2mm	Aço carbono L= 10mm
Diâmetro arame (mm)		1,2	1,2	0,8 (Al-Si)	0,8 (Al-5Si)	1,2	1,2	1,2	1,2	-	1	3,2	1,2
Diâmetro eletrodo (mm)		2,4	2,4	-	-	4	4	-	4	-	2,4	-	4

Fonte: (Dados da pesquisa)

### 2.3.2 *Parâmetros de interesse da soldagem híbrida TIG-MIG/MAG*

Corrêa (1999) destaca que os parâmetros que mais influenciam na soldagem a arco são: corrente e tensão do arco, velocidade do arame, vazão do gás, velocidade de deslocamento da tocha, comprimento do arco, comprimento do eletrodo, diâmetro do eletrodo e, por fim o tipo de junta. Para Fortes (2005) somente quatro destes fatores tem maior influência sobre as características do cordão de solda sendo eles: a corrente de soldagem, a extensão do eletrodo, a tensão de soldagem e a velocidade de soldagem.

Os parâmetros de soldagem utilizados em processos híbridos podem definir a produtividade, eficiência e aparência de solda. Chen et al. (2017) e Meng et al. (2014) recomendam que no processo TIG-MIG/MAG a tocha TIG esteja liderando o processo e a tocha MIG/MAG sendo puxada para se alcançar tais características.

A partir dos dados da Tabela 1 tem-se que a dentro os pesquisadores encontrados todos utilizaram em seus estudos uma configuração onde o eletrodo na parte MIG/MAG se encontrava na polaridade inversa (convencional) e o eletrodo TIG na polaridade direta.

Experimentos realizados através do processo de soldagem TIG-MIG/MAG mostram que a corrente de soldagem pode influenciar na velocidade de soldagem, penetração, espessura e estabilidade do arco de soldagem (CHEN et al., 2017; KANEMARU et al., 2014, 2015; MENG et al., 2014). Kanemaru et al. (2014, 2015) analisaram a influência do equilíbrio de corrente entre os arcos TIG e MIG/MAG e provaram que para se obter um arco estável, com a distância entre eletrodos de 4 mm, a corrente TIG tem de ser maior que a corrente MIG/MAG, quando esta configuração é utilizada o arco TIG consegue controlar a entrada de calor no arco mantendo um eficiência de soldagem em torno de 70%. No trabalho de Chen et al. (2017) é investigada a máxima velocidade de soldagem que pode ser obtida empregando-se uma baixa corrente na tocha TIG, como resultado obtêm-se um aumento na velocidade de soldagem de 1 m/min para 1,5 m/min mantendo a estabilidade do arco MIG com a tocha TIG liderando o processo de soldagem. Esta configuração também se mostrou de potencial para diminuir a entrada de calor no arco e possibilitar a utilização de equipamentos de mais baixo custo.

O ângulo de configuração das tochas pode influenciar o processo de diversas maneiras, Mishima et al. (2013) diz que o ajuste correto do ângulo entre as tochas possibilita a otimização de propriedades do plasma e da fonte de calor, para Chen, Wu, Chen (2014) quanto menor o ângulo das tochas maior será o fluxo de calor depositado na frente de soldagem e menor será o pico de temperatura do ciclo térmico. Kanemaru et al. (2013) procurava determinar o melhor ângulo entre as tochas TIG e MIG e determinaram que a

configuração das tochas no processo de soldagem TIG/MIG onde se obtém cordões de solda mais planos com relação a largura e altura e menor grau repulsa entre os arcos, acontece quando os ângulos de torção são TIG  $0^\circ$  e MIG  $+45^\circ$  onde  $0^\circ$  é encontrado quando a tocha esta posicionada perpendicularmente a peça e o  $+45^\circ$  na direção empurrando.

Meng et al. (2014) mostrou através de um estudo ortogonal que a distância entre eletrodo TIG e arame MIG, é um fator que influencia fortemente a estabilidade do arco no processo híbrido. O valor ótimo encontrado pelos pesquisadores foi de 12 mm onde se obteve uma maior área de aquecimento ao longo da direção de soldagem com um arco estável. Para Chen et al. (2017) a distância horizontal entre os eletrodos deve ser maior que 5 mm para se reduzir a queima do eletrodo de tungstênio e conseguir se estabilizar os arcos.

Com relação ao gás de proteção o estudo de Kanemaru et al. (2014) cita que apesar de ser recomendada a utilização de misturas de Ar com O ou  $\text{CO}_2$  para o processo MIG/MAG, a utilização de Ar puro em ambos os processos, nas condições do estudo, não causa desestabilidade no arco MIG pelo fato de haver um arco TIG liderando o processo.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais, equipamentos utilizados e os procedimentos realizados no decorrer do estudo.

As soldas, preparação de amostras e ataques químicos foram realizadas no Laboratório de Fabricação Mecânica do curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, que disponibilizou o equipamento e a maioria dos insumos consumíveis utilizados.

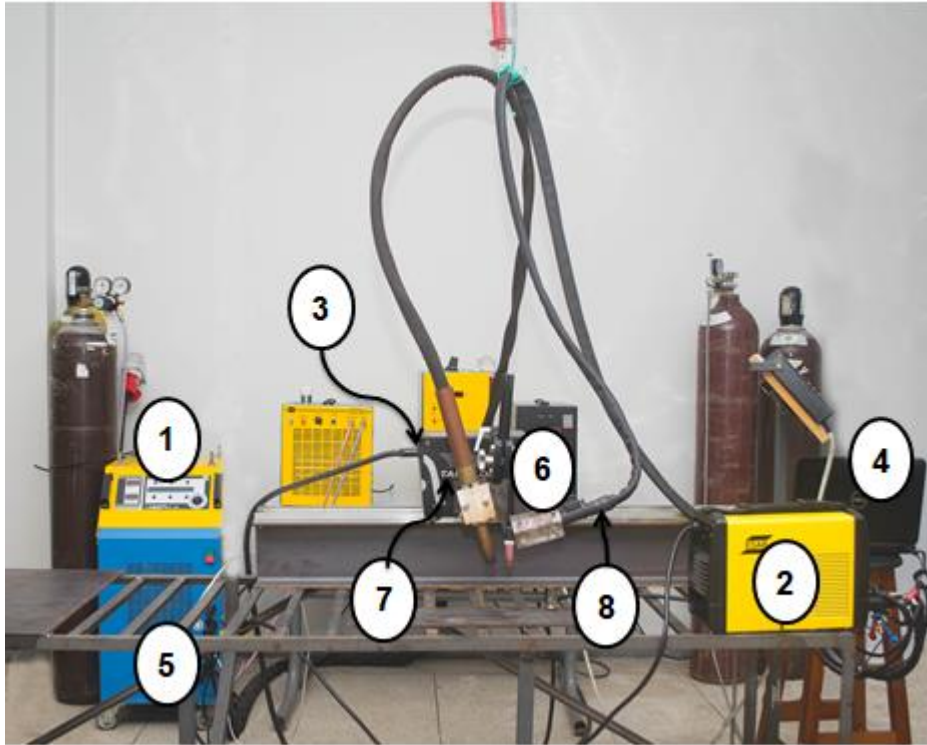
#### 3.1 Materiais e equipamentos

Para a realização das soldagens foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. Fonte de soldagem DIGIPlus A7 da marca IMC para operar a parte MIG/MAG do processo, utilizada na função tensão constante;
2. Fonte de soldagem LHN modelo 220i Plus da marca ESAB para operar a parte TIG do processo, utilizada na função corrente constante.
3. Sistema de deslocamento automático de tocha em dois eixos TARTÍLOPE modelo V2F da marca SPS;
4. Sistema de aquisição e monitoramento de dados. Detalhes de desenvolvimento são especificados no Apêndice I;
5. Bancada de aço para apoio de equipamentos e das peças a serem soldadas;
6. Suporte metálico adaptado para as tochas TIG e MIG/MAG ;
7. Tocha MIG/MAG adaptada para operação automatizada ;
8. Tocha TIG adaptada para operação automatizada ;

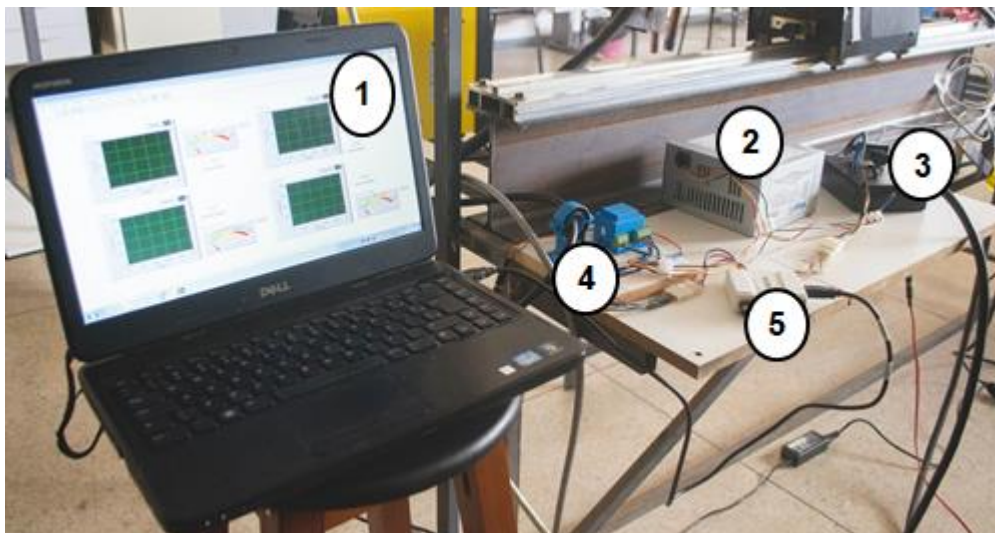
A Figura 14 ilustra todos os equipamentos utilizados, segundo sua numeração, na Figura 15 tem-se o sistema de aquisição.

Figura 14 - Equipamentos utilizados.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 15 - Sistema de aquisição e condicionamento de dados. 1 - Computador com programação de aquisição; 2 - Fonte simétrica +/- 12 V para alimentação dos sensores; 3 - Módulo 1; 4 - Módulo 2; 5 - Placa NI-USB-6008.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Para a execução dos testes seguiu-se a seguinte ordem de operação:

- Inserção dos parâmetros nas fontes de soldagens;
- Posicionamento dos equipamentos no espaço de trabalho;

- Ativação do sistema de aquisição e monitoramento;
- Abertura do arco TIG;
- Acionamento do movimentador automatizado;
- Abertura do arco MIG/MAG;
- Fechamento do arco TIG;
- Fechamento do arco MIG/MAG;
- Desativação do movimentador automatizado;
- Desativação do sistema de aquisição e monitoramento.

Materiais consumíveis:

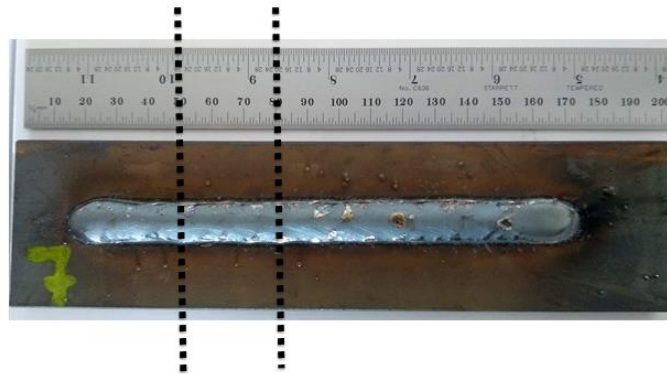
1. Corpos de prova : Chapas de aço carbono SAE 1020 com as dimensões de 50,8 x 200 x 6,35 mm.
2. Gás de proteção TIG: 100%Ar ;
3. Gás de proteção MIG/MAG : 92%Ar8%CO<sub>2</sub> ;
4. Arame de soldagem MIG/MAG: AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro;
5. Eletrodo TIG : AWS A5. 12-98-EWTH-2 de 2,4 mm.

Todas as soldas foram realizadas por simples deposição sobre chapa (bead-on-plate). A escolha dos materiais consumíveis foi realizada através do estudo dos materiais mais utilizados por pesquisadores de soldagem e pela disponibilidade de recursos do laboratório de fabricação.

A fim de obter a macrografia das soldas foram realizados nos corpos de prova o corte, polimento e ataques químicos. Para tanto foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

1. Serra fita para o corte dos corpos de prova e amostras para macrografias, nas duas localidades descritas na Figura 16;
2. Politriz lixadeira de velocidade variável, Modelo PVV, marca Teclago, para o lixamento das seções transversais dos cordões;
3. Resina para laminação, da marca Farben para embutimento das amostras;
4. Solução Nital à 10%, para ataque químico e revelação da macrografia;
5. Microscópio digital USB, marca HOT, modelo S02, para fotografar as amostras;
6. Software ImageJ, para medição da geometria das soldas
7. Software Minitab®, para tratamento dos dados.

Figura 16 - Delimitação dos cortes do experimento para macrográfia.

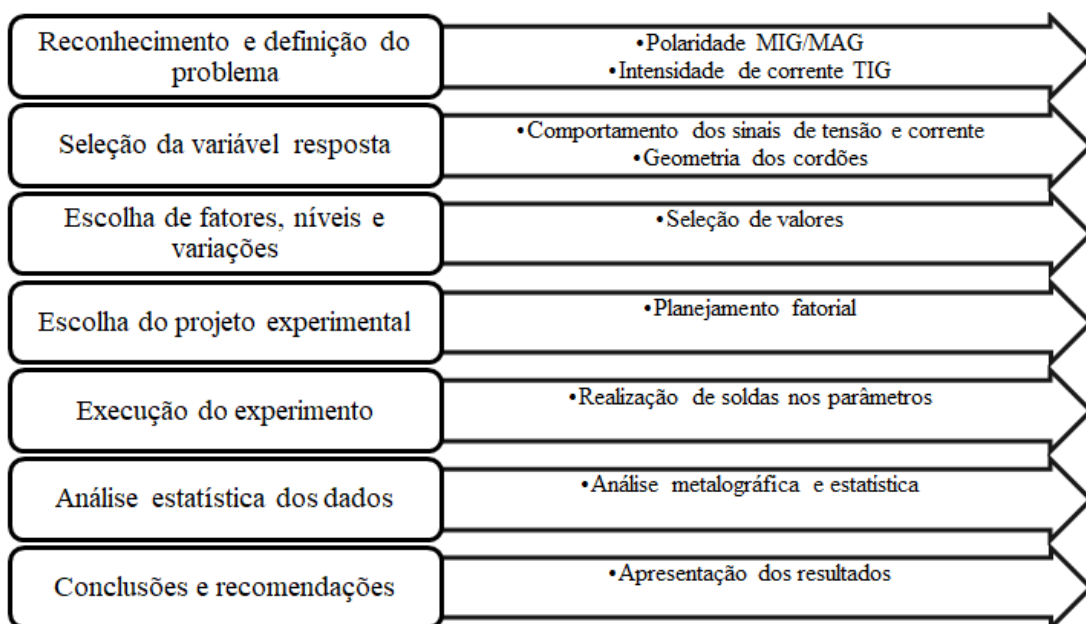


Fonte: (Dados da pesquisa)

### 3.2 Projeto de experimentos

Para Vasconcelos (2004) *apud* Schneider (2014), o planejamento e análise de experimentos objetiva a determinação dos fatores e variáveis de entrada que produzem maiores influências nos resultados e na qualidade do processo. Montgomery (2012) propõe para a condução de um projeto experimental o fluxograma com passos a serem seguidos, conforme Figura 17. A esquerda da figura tem-se os passos sugeridos e à direita a ação realizada na pesquisa em cada uma das fases.

Figura 17 - Passos para condução de um projeto de experimentos.



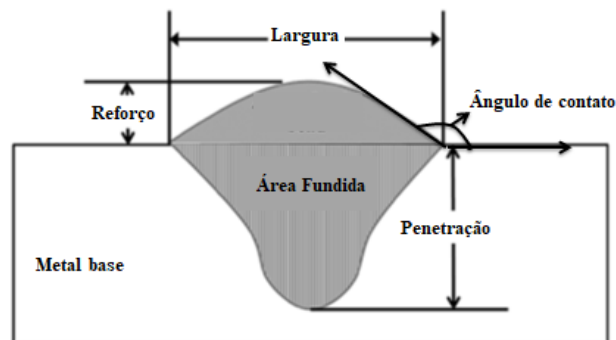
Fonte: (Adaptado de Montgomery, 2012)

Ao se realizar estudos que envolvem os efeitos de diversos fatores, geralmente se é utilizado o experimento fatorial, este investiga em cada ensaio completo ou réplica do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores (MONTGOMERY, 2012).

### 3.3 Características de geometria do cordão de solda

A geometria do cordão de solda é um dos elementos que define as propriedades mecânicas da solda. A qualidade de solda esta sujeita sobretudo as propriedades mecânicas do metal e pela zona afetada pelo calor (TORRES, 2013). Para o estudo da geometria de cordão de solda, foram avaliadas as características ilustradas na Figura 18.

Figura 18 - Principais características do cordão de solda



Fonte: (Adaptado de CRUZ, TORRES, ALFARO, 2015).

Variáveis como largura, reforço e profundidade de penetração, são determinados por parâmetros operacionais, incluindo a corrente e tensão de solda, a velocidade de soldagem, o gás de proteção, entre outras (TORRES, 2013). A área fundida é composta por metal base e metal de adição fundidos.

## CAPÍTULO 4

### ENSAIOS PRELIMINARES

Este Capítulo apresenta os resultados obtidos com os testes iniciais com relação ao comportamento dos sinais de soldagem dos cordões realizados pelo processo TIG-MIG/MAG, bem como uma avaliação da geometria de solda relacionando as variáveis de entrada com os parâmetros de resposta analisados.

#### 4.1 Procedimento experimental

Definiu-se um planejamento fatorial composto por dois fatores, sendo o primeiro fator a polaridade MIG/MAG (convencional e direta) e o segundo a intensidade de corrente TIG (0, 50 e 150 A). Os resultados do planejamento determinaram seis experimentos, sendo dois realizados pelo processo MIG/MAG convencional (testes 1 e 2) e quatro pelo processo TIG-MIG/MAG (testes 3 ao 6) como indicado na matriz experimental montada através da combinação dos níveis e fatores definidos na Tabela 2.

A intensidade de corrente MIG/MAG foi definida em 250 A a fim de alcançar condições onde as características dos oscilogramas dos sinais elétricos do processo apresentassem característica de transferência metálica do tipo goticular. Assim, para cada uma das polaridades foram ajustados os níveis de tensão e velocidades de alimentação e soldagem a fim de garantir uma relação constante entre as duas últimas variáveis. A relação velocidade de alimentação/velocidade de soldagem também garantiu que os cordões em cada uma das polaridades estivessem em uma mesma taxa de deposição. Para a soldagem MIG/MAG a fonte foi utilizada na função tensão constante e para a soldagem TIG na função corrente constante. A Tabela 3 apresenta os parâmetros mantidos constantes nos experimentos.

Tabela 2 - Matriz experimental ordenada conforme realização dos experimentos.

Fatores	Polaridade MIG/MAG		Corrente TIG			
	Níveis	Convencional	Direta	0	50	150
Teste 1			x	x		
Teste 2		x		x		
Teste 3		x			x	
Teste 4		x				x
Teste 5			x			x
Teste 6			x		x	

Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 3 - Parâmetros mantidos constantes para os experimentos.

Parâmetro	Quantificação
Ângulo da ponta do eletrodo TIG	30°
Vazão de gás de proteção TIG	10 l/min
Ângulo da tocha TIG	0°
Distância entre o eletrodo e a peça TIG	5 mm
Polaridade TIG	Direta
Corrente TIG	0 A / 50 A / 150 A
Distância do bico de contato à peça MIG/MAG (DBCP)	20 mm
Polaridade MIG/MAG	Convencional e Direta
Vazão de gás de proteção MIG/MAG	15 l/min
Ângulo da tocha MIG/MAG	-30°
Tensão MIG/MAG	30,0 V (Convencional) e 32,4 V (Direta)
Corrente MIG/MAG	≈ 250 A
Velocidade de alimentação de arame MIG/MAG	8 m/min (Convencional) e 11 m/min (Direta)
Velocidade de soldagem	80 cm/min (Convencional) e 110 cm/min (Direta)
Distância entre eletrodos	12 mm

Fonte: (Dados da pesquisa)

Com relação à geometria do cordão, buscou-se cordões que não apresentassem descontinuidades detectadas através de inspeção visual; com boa qualidade e acabamento; penetração maior sem a necessidade de muito reforço e largura dentro dos padrões encontrados na literatura. Como parâmetro central de investigação utilizou-se a polaridade do processo MIG/MAG e os valores de corrente TIG. Assim, os parâmetros de saída analisados foram reforço, penetração, largura, zona fundida e ângulo de contato do cordão.

Para fins de nomenclatura, neste Capítulo, a expressão 'TIG-MIG/MAG na polaridade direta' se refere ao processo onde o eletrodo MIG/MAG se encontra na polaridade direta (eletrodo negativo). Enquanto que a expressão 'TIG-MIG/MAG na polaridade convencional' se refere ao processo onde o eletrodo MIG/MAG se encontra na polaridade inversa (eletrodo positivo). Em todas as configurações utilizadas, o eletrodo TIG permaneceu na polaridade direta (eletrodo negativo).

Com a aquisição dos sinais elétricos, foram plotados os oscilogramas referentes a cada teste, e obtidos dados relacionados à média e valor eficaz (RMS) dos sinais. Foram definidas três zonas de análise dos sinais. Para os testes 1 e 2, a coluna 1 indica dados onde nenhum processo está em operação, na coluna 2 o processo MIG/MAG convencional em operação e na coluna 3 nenhum processo em operação. Para os testes 3 à 6 (testes com corrente TIG diferente de zero), tem-se na zona indicada pela coluna 1 os dados do início do cordão onde somente o processo TIG opera, na coluna 2 com ambos os processos em operação e na coluna 3 somente o processo MIG/MAG.

## **4.2 Resultados e discussões**

### *4.2.1 Comportamento dos sinais elétricos*

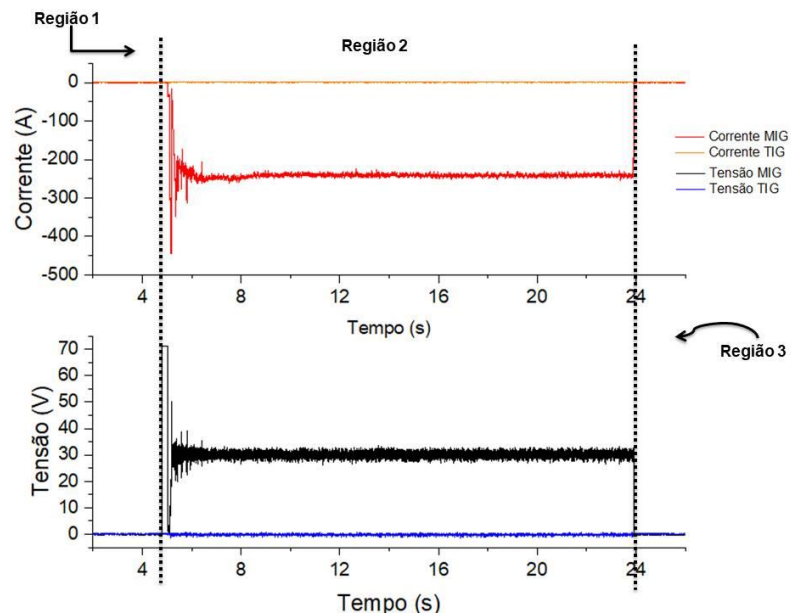
Representados nas Tabelas 4 e 5 estão os dados relacionados aos testes 1 e 2 e nas Figuras 19 e 20 tem-se seus respectivos oscilogramas, pode-se observar que os valores médios e RMS são muito próximos, típicos de transferência do tipo goticular. Em Nascimento et al. (2007) é apresentado um estudo sobre o cálculo da potência de soldagem e um de seus resultados mostram que para o modo de transferência metálica goticular os dados médios e eficazes dos sinais apresentam variações quase nulas, o que pode justificar os resultados obtidos. Através dos resultados do oscilograma, observa-se que, no momento em que o processo MIG/MAG inicia sua operação há um pequeno aumento na tensão e corrente eficaz do processo TIG.

Tabela 4 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com MIG/MAG na polaridade direta.

MIG/MAG na polaridade direta						
	1		2		3	
	Média	RMS	Média	RMS	Média	RMS
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	-0,142	0,172	30,109	30,410	-0,166	0,190
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,095	0,188	-242,156	242,260	0,101	0,196
<b>Tensão TIG (V)</b>	0,139	0,192	-0,160	0,606	0,132	0,188
<b>Corrente TIG (A)</b>	0,408	0,454	0,332	0,669	0,402	0,444

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 19 - Oscilograma para o processo TIG-MIG/MAG com o circuito MIG/MAG na polaridade direta.



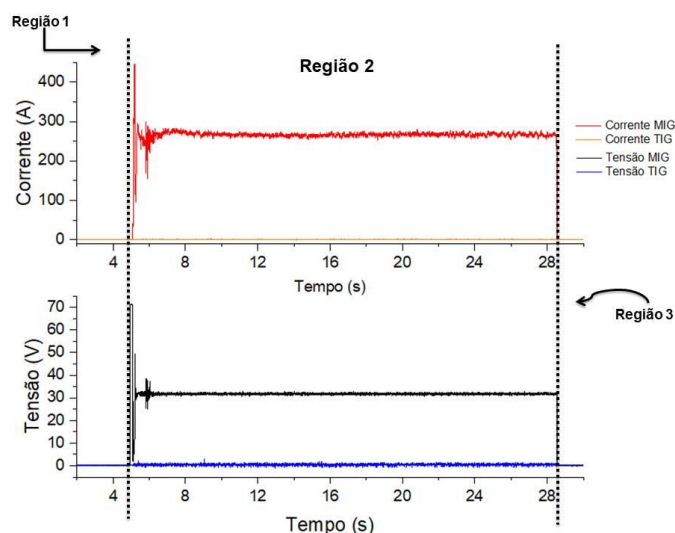
Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 5 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com MIG/MAG na polaridade convencional.

MIG/MAG na polaridade convencional						
	1		2		3	
	Média	RMS	Média	RMS	Média	RMS
Tensão MIG/MAG (V)	-0,015	0,108	31,750	31,754	-0,017	0,108
Corrente MIG/MAG (A)	0,371	0,402	264,990	265,093	0,381	0,409
Tensão TIG (V)	0,236	0,273	0,478	0,758	0,240	0,276
Corrente TIG (A)	0,403	0,458	0,402	0,731	0,396	0,449

Fonte: (Dados da pesquisa)

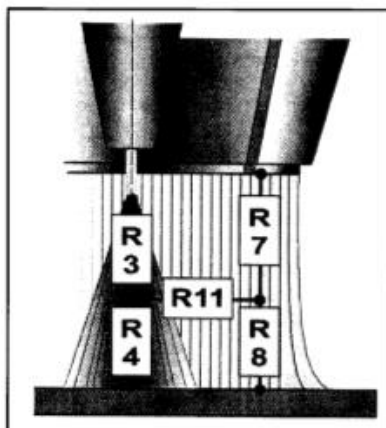
Figura 20 - Oscilograma para o processo TIG-MIG/MAG com o circuito MIG/MAG na polaridade convencional.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Matthles e Kohler (2002) mencionam que em processos que combinam um arco plasma e um arco MIG/MAG existe uma diferença de potencial entre os arcos individuais, levando a um esforço para equilibrar esta diferença, neste esforço então surge uma corrente transversal entre os arcos. Em seu modelo, o arco híbrido é descrito através de resistências elétricas, como na Figura 21, onde R3 e R4 correspondem a corrente MIG/MAG e R7 e R8 a corrente plasma, sendo que R3 e R7 localizadas acima da zona de compensação e R4 e R8 abaixo, a corrente transversal é descrita por eles como R11. Mesmo que o arco TIG não operando nos testes 1 e 2 sua fonte permaneceu ligada durante o procedimento, assim esta corrente transversal pode explicar o comportamento dos sinais de tensão e corrente TIG a partir do momento em que o arco MIG/MAG é introduzido no processo.

Figura 21 - Modelo elétrico para o processo Plasma-MIG segundo Matthles e Kohler.



Fonte: (MATTHLES; KOHLER, 2002)

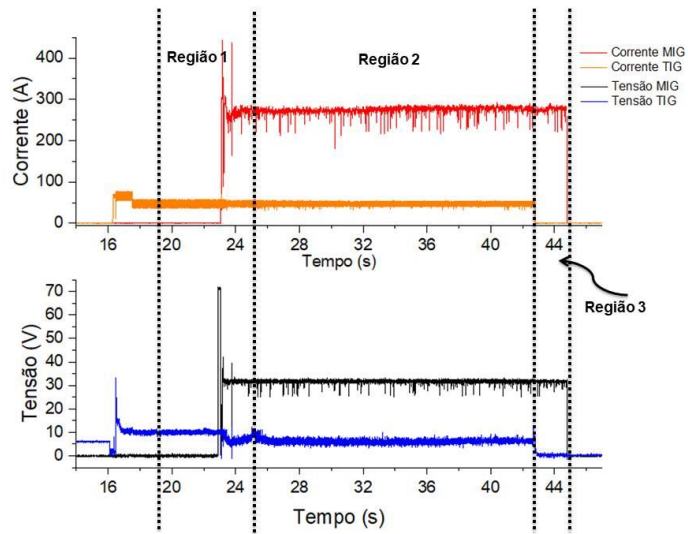
A influência das correntes transversais também é observada nos testes 3 e 4, onde, com um fluxo maior de corrente do processo TIG buscou-se uma forma de balancear a diferença de potencial entre os arcos. A partir da inserção do arco MIG/MAG no processo, a tensão e corrente TIG diminuíram suas intensidades, isto pode ser observado nos dados dos testes 3 e 4, nas Tabelas 6 e 7 e Figuras 22 e 23.

Tabela 6 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com TIG-MIG/MAG convencional com TIG a 50 A.

<b>TIG-MIG/MAG convencional com TIG a 50 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	0,008	0,527	31,678	31,701	31,677	31,695
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,436	0,756	277,813	278,095	276,805	277,041
<b>Tensão TIG (V)</b>	10,066	10,152	6,019	6,155	0,473	0,894
<b>Corrente TIG (A)</b>	46,945	50,878	46,949	48,967	0,478	1,003

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 22 - Oscilograma para o processo TIG-MIG/MAG convencional com 50 A no circuito TIG.



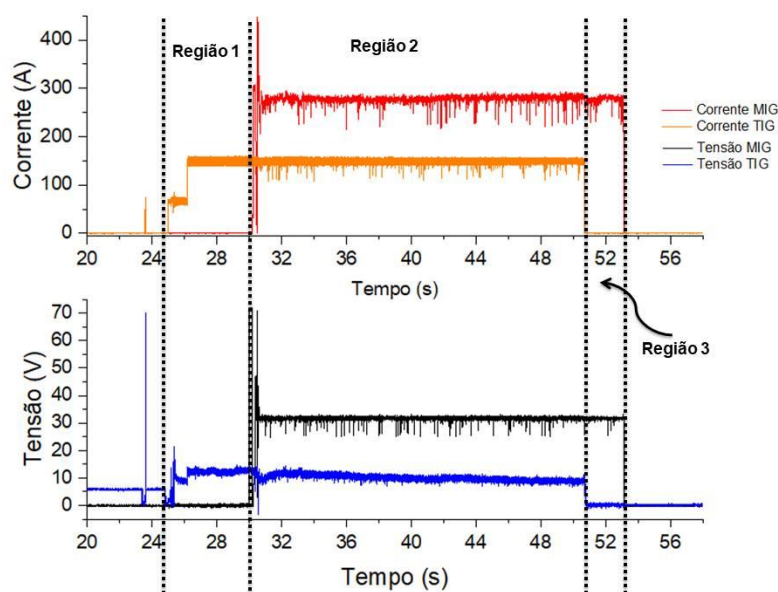
Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 7 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com TIG-MIG/MAG convencional com TIG a 150 A.

<b>TIG-MIG/MAG convencional com TIG a 150 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	-0,002	0,528	31,717	31,739	31,685	31,696
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,415	0,786	277,637	277,885	278,418	278,635
<b>Tensão TIG (V)</b>	12,329	12,427	9,828	9,941	0,258	0,675
<b>Corrente TIG (A)</b>	148,309	150,131	148,077	149,568	0,423	0,914

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 23 - Oscilograma de TIG-MIG/MAG convencional com TIG a 150 A.



Fonte: (Dados da pesquisa)

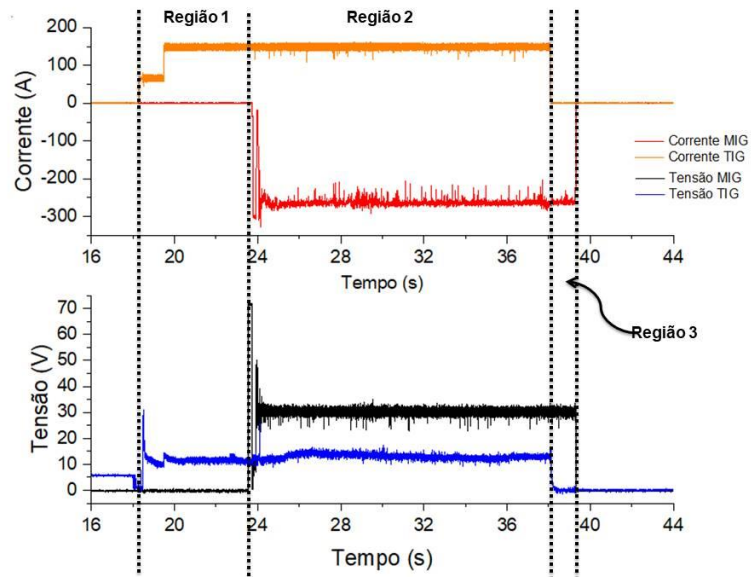
Com a mudança da polaridade MIG/MAG para o modo direto, os sinais dos testes 5 e 6 também evidenciaram a presença de correntes transversais, porém para o teste 5 com comportamento contrário aos testes 3 e 4, neste experimento com a inserção do arco MIG/MAG o processo buscou um equilíbrio que provocou um leve aumento na intensidade de tensão e corrente TIG, isto podendo ser observado, nas tabelas 8 e 9 e figuras 24 e 25.

Tabela 8 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com TIG-MIG/MAG direto com TIG a 150 A.

TIG-MIG/MAG direto com TIG a 150 A						
	1		2		3	
	Média	RMS	Média	RMS	Média	RMS
Tensão MIG/MAG (V)	-0,175	0,524	30,149	30,460	30,130	30,437
Corrente MIG/MAG (A)	0,246	0,689	-261,982	262,269	-262,623	262,759
Tensão TIG (V)	11,568	11,666	13,765	13,885	0,547	1,563
Corrente TIG (A)	148,064	149,797	147,961	150,087	0,396	0,912

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 24 - Oscilograma de TIG-MIG/MAG direto com TIG a 150 A.



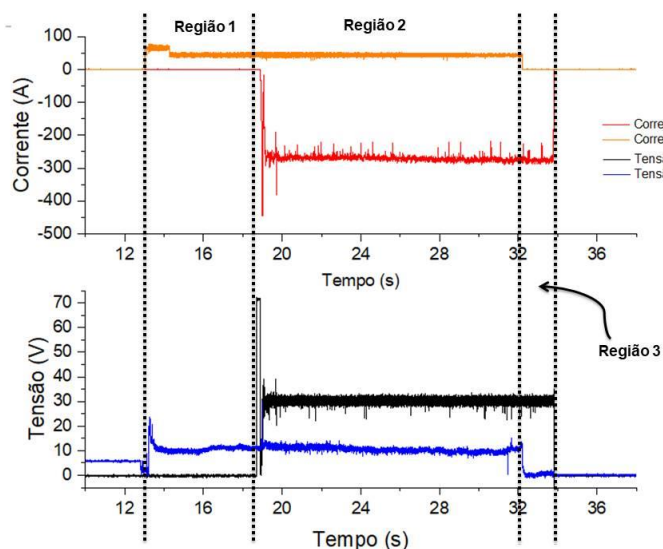
Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 9 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente com TIG-MIG/MAG direto com TIG a 50 A.

TIG-MIG/MAG direto com TIG a 50 A						
	1		2		3	
	Média	RMS	Média	RMS	Média	RMS
Tensão MIG/MAG (V)	-0,166	0,500	30,164	30,465	30,118	30,427
Corrente MIG/MAG (A)	0,274	0,671	-271,463	271,608	-277,326	277,539
Tensão TIG (V)	11,192	11,283	10,200	10,318	0,264	0,898
Corrente TIG (A)	43,409	48,165	43,450	47,896	0,396	0,960

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 25 - Oscilograma de TIG-MIG/MAG direto com TIG a 50 A.



Fonte: (Dados da pesquisa)

#### 4.2.2 Análise de geometria dos cordões

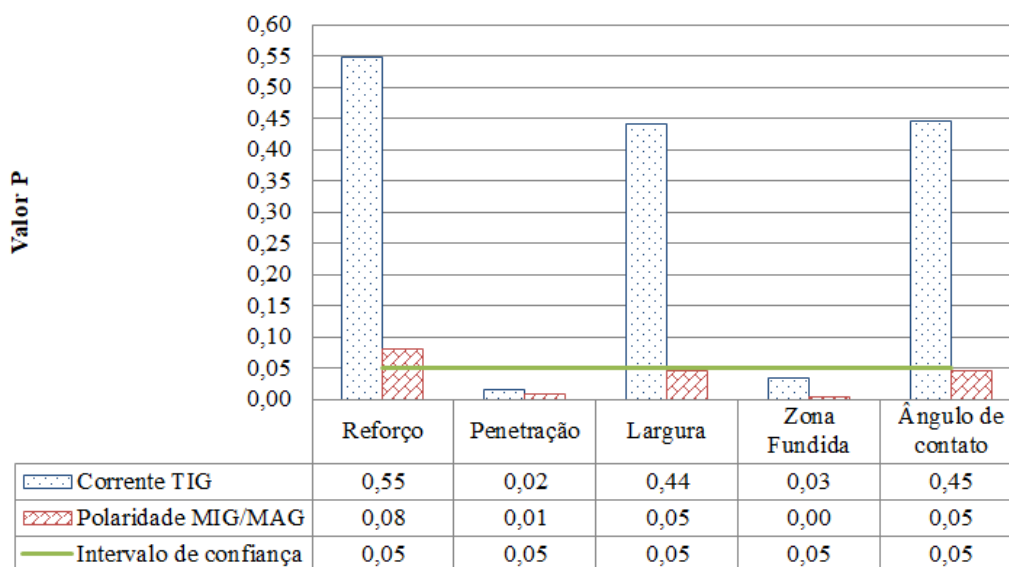
A análise dos resultados obtidos através da macrografia foi realizada com o software Minitab. Primeiramente foi realizada a análise de variância, relacionado os parâmetros de controle (polaridade MIG/MAG e intensidade de corrente TIG) com os parâmetros de saída (reforço, penetração, largura, área fundida e ângulo de contato do cordão). Para tanto, considerou-se um intervalo de confiança mínimo de 95%. Este intervalo corresponde a um nível de significância, *valor P*, igual ou inferior a 0,05. Os resultados gerais podem ser vistos na Tabela 10 e na Figura 26 os resultados da análise de variância.

Tabela 10 - Resultados da análise macrográfica.

Testes	Polaridade MIG/MAG	$I_{TIG}$ (A)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área Fundida (mm <sup>2</sup> )	Ângulo de contato (°)
2	Convencional (+)	0	2,90	12,50	2,15	16,75	37,0
3		50	2,92	13,58	1,89	18,33	31,5
4		150	2,85	11,78	2,82	21,56	41,0
1	Direta (-)	0	3,80	7,99	1,56	7,83	68,5
6		50	3,16	9,81	1,22	8,113	54,5
5		150	3,57	9,80	2,01	11,17	55,0

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 26 - Resultados análise de variância.



Fonte: (Dados da pesquisa)

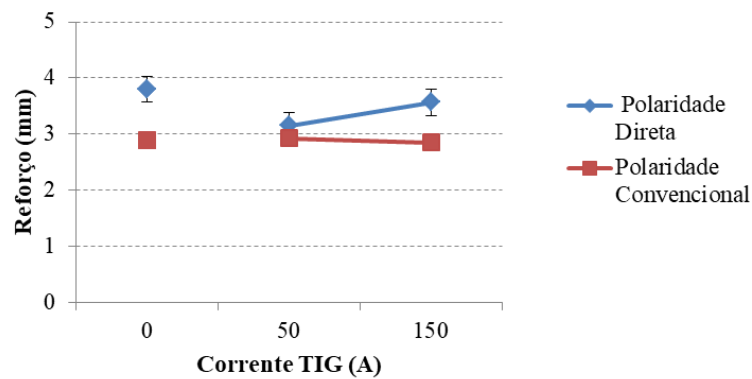
De acordo com os resultados da análise de variância apresentados no gráfico. Para o reforço, nenhuma das variáveis trabalhadas apresentou influência significativa na resposta. Para a penetração e zona fundida, tanto a intensidade de  $I_{TIG}$  (corrente TIG) quanto a polaridade MIG/MAG exercem influência significativa nos resultados, para a largura e o ângulo de contato somente a polaridade MIG/MAG tem efeito significativo na resposta. Assim, em aspectos gerais, a polaridade MIG/MAG apresenta influência significativa em mais parâmetros que a intensidade de corrente TIG. Com o intuito de analisar melhor o comportamento de cada variável resposta com relação aos parâmetros e facilitar o entendimento dos dados foram dispostos em gráficos individuais os resultados de suas interações.

#### 4.2.2.1 Análise do reforço do cordão de solda

A Figura 27 mostra o gráfico de interação entre as variáveis de entrada e o reforço e a Figura 28 o gráfico dos efeitos principais das variáveis, observa-se que na polaridade MIG/MAG direta o reforço de solda é maior que na polaridade MIG/MAG convencional, seguindo a literatura no que diz respeito às características do reforço para cada uma das polaridades. Apesar do reforço, de acordo com a análise de variância, ser uma variável não influenciada por nenhum dos fatores tem-se que a inserção de  $I_{TIG}$  no processo direto leva a uma diminuição no reforço, este fato se dá pelo aumento da largura dos cordões, uma vez que se têm cordões mais largos o reforço tem que diminuir fato também notado por

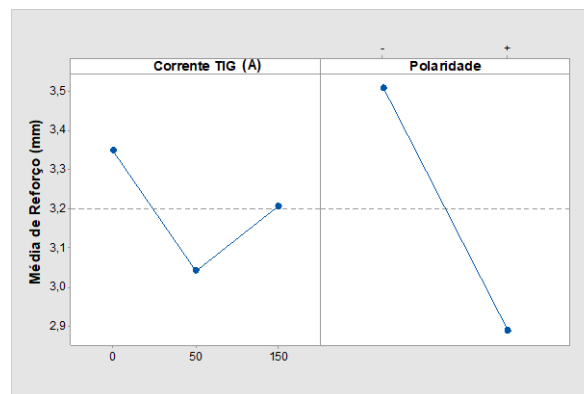
Resende & Scotti (2017). O incremento de  $I_{TIG}$  apresenta variações muito pequenas relacionadas ao reforço, uma vez que a variável não mostra ser significativa na análise de variância assim como no estudo de Teixeira (2011). Para o processo TIG-MIGMAG na polaridade direta tem-se que o menor valor de reforço se dá com a intensidade de corrente de 50 A, como no estudo de Schneider (2014) onde menores reforços foram encontrados em menores níveis de corrente TIG.

Figura 27 - Interação de variáveis com relação ao reforço.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 28 - Efeitos principais das variáveis com relação ao reforço.



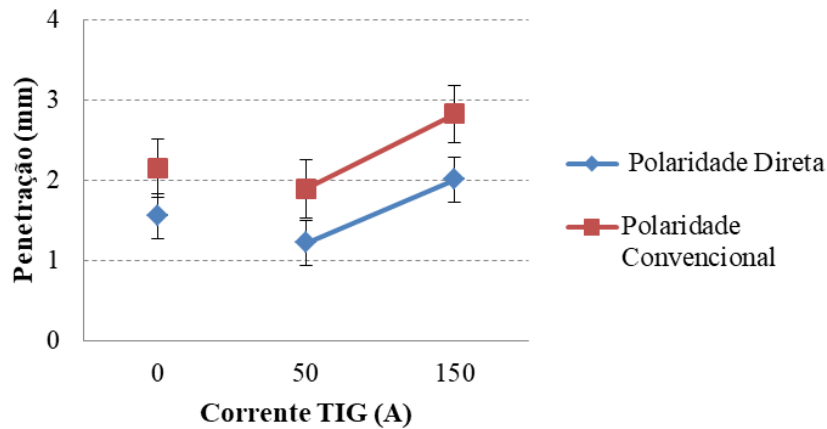
Fonte: (Dados da pesquisa)

#### 4.2.2.2 Análise da penetração do cordão de solda

Segundo a análise de variância a penetração é o parâmetro de saída que sofre influência significativa dos dois fatores variados, segundo os gráficos representados nas Figuras 29 e 30 observa-se que na polaridade MIG/MAG convencional há uma maior penetração se comparada a polaridade MIG/MAG direta, devido a característica do processo onde na polaridade direta o processo demanda menor quantidade de calor transferido à peça. Ao se inserir o arco TIG com a intensidade de corrente de 50 A observa-se uma menor

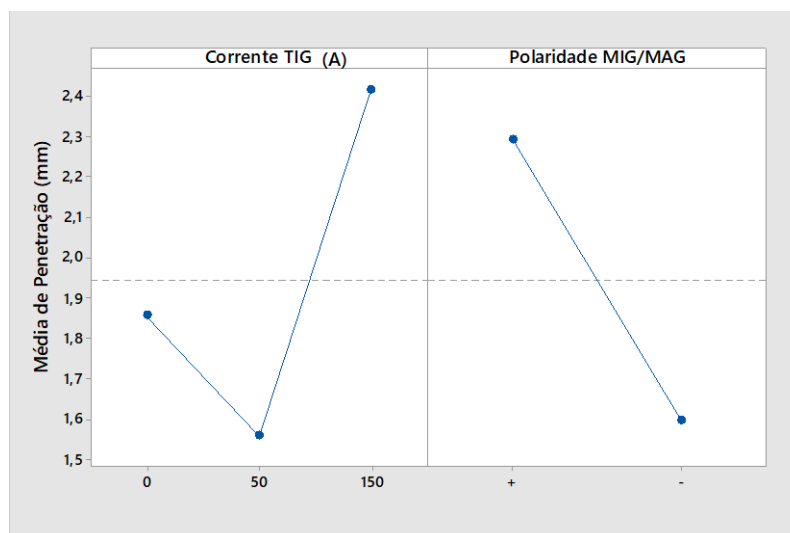
penetração, fato que pode ter se ocasionado pelo aumento da largura dos cordões, pois com uma maior área aquecida a energia transferida ao metal base deixa de estar concentrada reduzindo um pouco a penetração como visto em Resende & Scotti (2017). O aumento da penetração na a intensidade de corrente TIG de 150 A pode ser explicada através do estudo de Rodrigues (2007) onde observa-se que para o processo MIG/MAG, operando em modo goticular, maiores fluxos de corrente geram uma maior movimentação das gotas levando a um aumento da penetração de soldagem. O estudo de Kanemaru et al (2013) demonstra que aumentando-se a corrente TIG há um aumento da penetração e que quando a corrente TIG se encontra em um nível muito baixo esta variável não influencia no valor de penetração.

Figura 29 - Interação de variáveis com relação a penetração.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 30 - Efeitos principais das variáveis com relação à penetração.

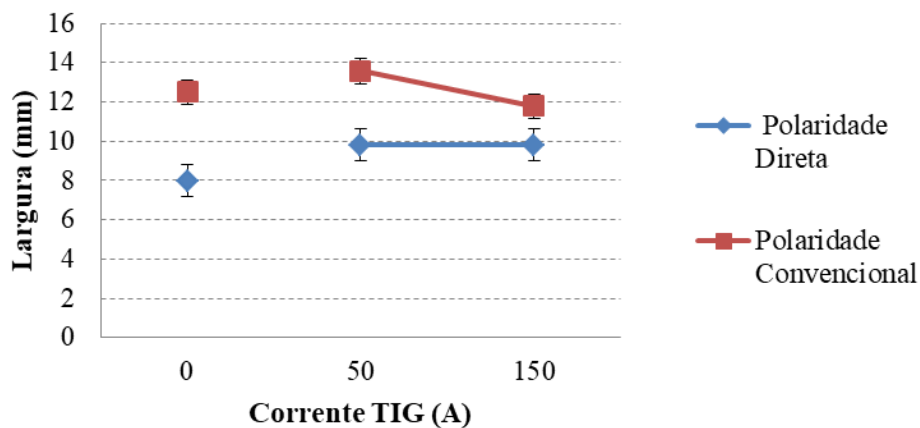


Fonte: (Dados da pesquisa)

#### 4.2.2.3 Análise da largura do cordão de solda

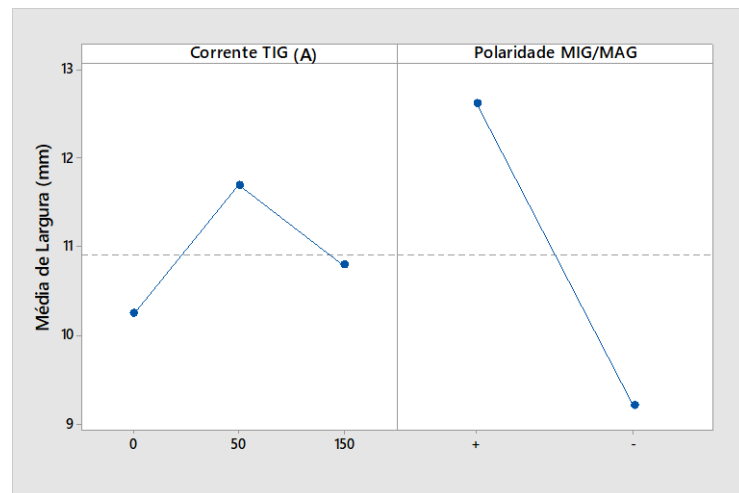
De acordo como os gráficos representados nas Figuras 31 e 32, nota-se que a inserção do arco TIG em ambas as polaridades tende a aumentar a largura dos cordões, pois com o arco híbrido, a área de contato aumenta em relação ao processo convencional, assim, com uma maior área de chapa aquecida, têm-se uma maior molhabilidade e por consequência cordões mais largos como observado por Resende & Scotti (2017). O incremento de 100 A na corrente TIG gerou pequenas diferenças na largura do cordão para a tocha MIG/MAG na polaridade direta como observado por Teixeira (2011) onde a intensidade de  $I_{TIG}$  não apresentou significância para a largura do cordão. Para TIG-MIGMAG na polaridade convencional o incremento de  $I_{TIG}$  levou o cordão a uma largura menor do que a observada pelo processo MIG/MAG convencional, o que também foi notado no estudo de Schneider (2014) onde as melhores larguras foram obtidas com níveis intermediários de  $I_{TIG}$ . O fato dos cordões MIG/MAG na polaridade convencional terem demonstrado maior largura que os MIG/MAG de polaridade direta seguem a literatura no que diz a respeito de mudança de polaridade esta diferença pode ser vista no estudo de Talkington (1998).

Figura 31 - Interação de variáveis com relação à largura.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 32 - Efeitos principais das variáveis com relação à largura.

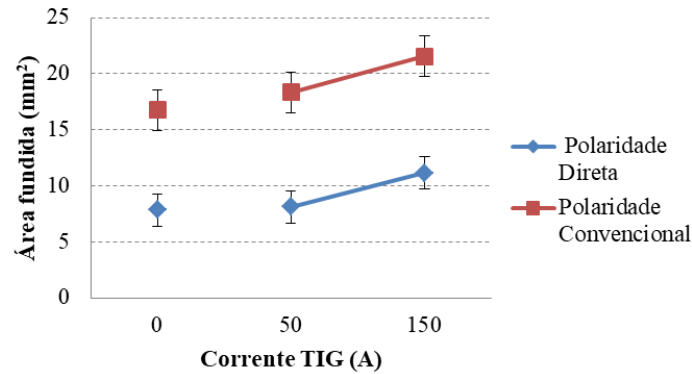


(Fonte: Dados da pesquisa)

#### 4.2.2.4 Análise da área fundida do cordão de solda

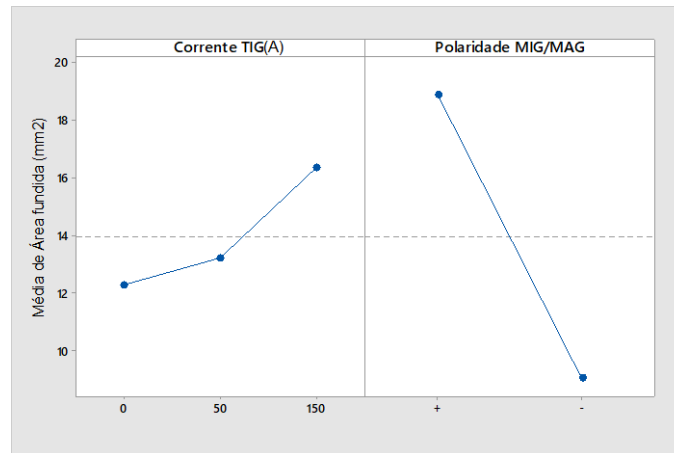
Na área fundida do cordão, área abaixo da linha de superfície da chapa, de acordo com os gráficos ilustrados nas Figuras 33 e 34, percebe-se uma tendência de aumento da área fundida, como esta variável está ligada diretamente a penetração seu comportamento segue uma mesma tendência. Quando se trabalha com maiores níveis de correntes para o processo MIG/MAG, operando em modo goticular, ocorre uma maior movimentação das gotas levando a um aumento da penetração de soldagem por consequência uma maior área fundida (RODRIGUES, 2007). Lembrando que a taxa de material a ser depositada no cordão permaneceu a mesma em cada uma das polaridades.

Figura 33 - Interação de variáveis com relação à área fundida.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 34 - Efeitos principais das variáveis com relação à área fundida.

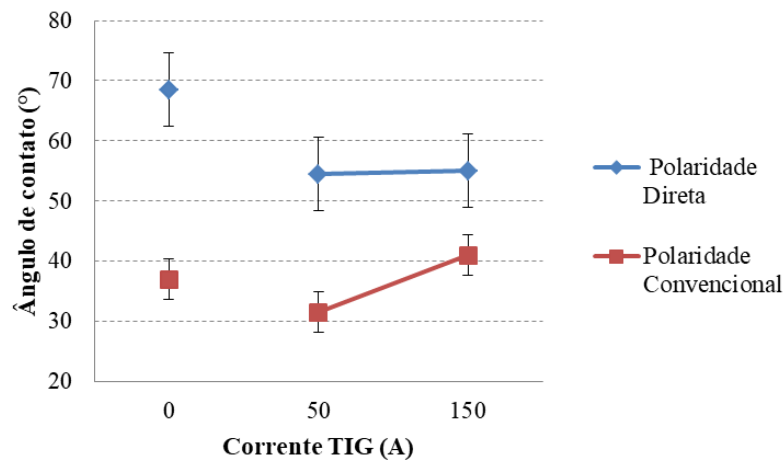


Fonte: (Dados da pesquisa)

#### 4.2.2.5 Análise do ângulo de contato do cordão de solda

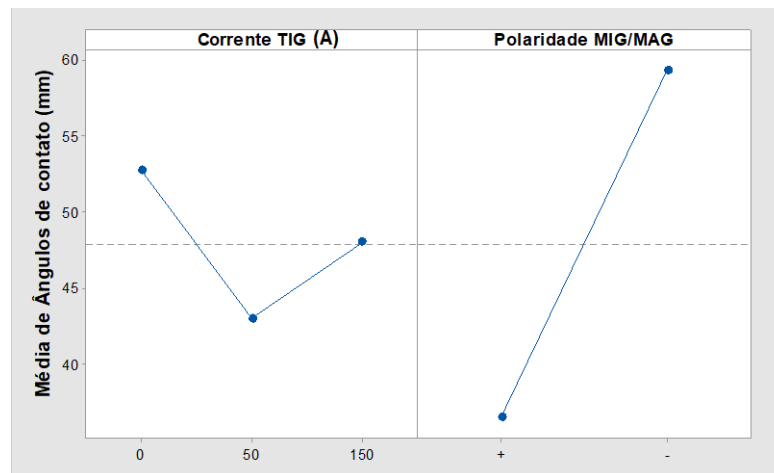
Os ângulos de contato do cordão de solda determinam a molhabilidade da solda, a literatura mostra que quanto menores os ângulos maior a molhabilidade, percebe-se que, de acordo com os gráficos representados das Figuras 35 e 36, a inserção do arco TIG uma tendência a uma maior molhabilidade como já discutido anteriormente, agora comprovado através dos ângulos de contato. A maioria das análises demonstraram que a inserção da  $I_{TIG}$  diminuiu a convexidade dos cordões, mais evidente para a polaridade MIG/MAG direta.

Figura 35 - Interação de variáveis com relação ao ângulo de contato do cordão.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 36 - Efeitos principais das variáveis com relação ao ângulo de contato do cordão.



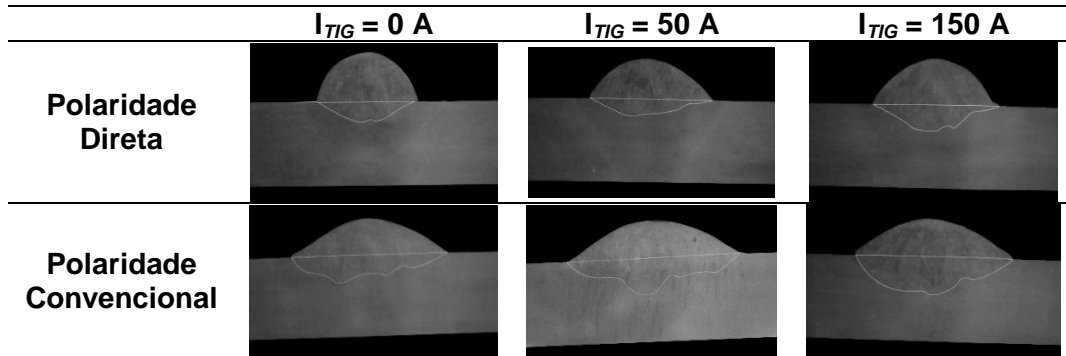
Fonte: (Dados da pesquisa)

#### 4.2.2.6 Análise dos aspectos visuais dos cordões

As Tabelas 11 e 12 ilustram os aspectos visuais dos cordões realizados e suas respectivas seções transversais, através de inspeção visual pode-se observar que para os cordões realizados em polaridade MIG/MAG direta, devido a características do processo, que apresentam maior instabilidade em seu formato, cordões com maior convexidade e maior quantidade de respingos. Quanto ao aspecto de convexidade foi demonstrado seus efeitos no tópico anterior, em relação aos respingos, pela inspeção visual, notou-se que a

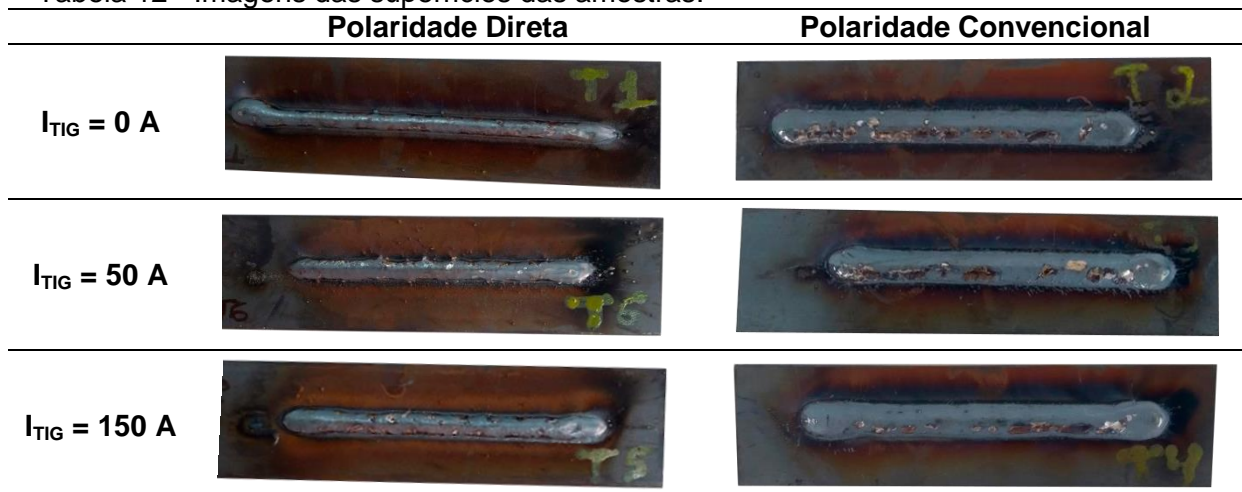
intensidade de  $I_{TIG}$  de 50 A apresenta maior quantidade de respingos que a intensidade de 150 A para TIG-MIG/MAG na polaridade direta.

Tabela 11 - Imagens de secções transversais dos experimentos. Chapa com espessura de 6,35 mm.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 12 - Imagens das superfícies das amostras.



Fonte: (Dados da pesquisa)

### 4.3 Considerações finais

Pode-se concluir a partir destes experimentos nos parâmetros avaliados que:

- No processo de soldagem TIG-MIG/MAG, variando a polaridade do circuito MIG/MAG e a intensidade da corrente TIG, é possível atuar sobre a geometria do cordão de solda.
- Os cordões realizados com a tocha MIG/MAG na polaridade direta se mostraram mais convexas, com maiores níveis de reforço e menores penetrações, enquanto que na polaridade convencional os cordões se mostraram mais largos, com maiores penetrações e menores reforços.

- A presença do arco TIG foi capaz de reduzir a convexidade dos cordões de solda, independente da polaridade.
- Os resultados indicam que é possível aliar a maior taxa de fusão do processo MIG/MAG na polaridade direta com a menor convexidade do cordão de solda devido ao efeito do arco TIG.
- Para os níveis e fatores avaliados observou-se que o fator mais influente nos resultados foi a mudança de polaridade do processo MIG/MAG.

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE SINAIS ELÉTRICOS DE CORRENTE E TENSÃO**

Este Capítulo apresenta os resultados dos experimentos finais com relação ao comportamento dos sinais elétricos de soldagem dos cordões realizados pelos processos TIG-MIG/MAG e MIG/MAG apresentando os valores médios, RMS, potência instantânea média de soldagem bem como os oscilogramas de cada um dos experimentos.

#### **5.1 Procedimento experimental**

Com os resultados dos testes preliminares, definiu-se para os experimentos finais os seguintes parâmetros: para polaridade MIG/MAG (CCEN e CCEP), para a corrente TIG os níveis (0 A, 50 A, 100 A, 150 A e 200 A – todas na polaridade negativa), sendo que no momento em que a corrente TIG é 0 A tem-se o processo MIG/MAG convencional. A fim de manter a mesma energia de soldagem no processo MIG/MAG em todos os experimentos fixou-se o nível de tensão e corrente MIG/MAG em 28 V e 250 A, e para que se tivesse a mesma taxa na quantidade de material sendo depositado nos cordões sem variações no comprimento energizado de eletrodo, definiu-se uma faixa relacionando velocidade de alimentação de arame/velocidade de soldagem para cada polaridade. Na Tabela 13 a seguir têm-se os parâmetros utilizados e na Tabela 14 observa-se a matriz dos experimentos montada através da combinação dos níveis e fatores definidos.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados nos experimentos.

<b>Parâmetro</b>	<b>Quantificação</b>
Ângulo da ponta do eletrodo TIG	30°
Vazão de gás de proteção TIG	10 l/min
Ângulo da tocha TIG	0°
Distância entre o eletrodo e a peça TIG	5 mm
Polaridade TIG	Direta
Corrente TIG	0 A / 50 A / 100 A / 150 A / 200 A
Distância do bico de contato à peça MIG/MAG (DBCP)	20 mm
Polaridade MIG/MAG	Convencional e Direta
Vazão de gás de proteção MIG/MAG	10 l/min
Ângulo da tocha MIG/MAG	-30°
Tensão MIG/MAG	28,0 V
Corrente MIG/MAG	≈ 250 A
Velocidade de alimentação de arame MIG/MAG	8 m/min (Convencional) e 12 m/min (Direta)
Velocidade de soldagem	80 cm/min (Convencional) e 120 cm/min (Direta)
Distância entre eletrodos	12 mm

Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 14 - Matriz de planejamento de experimentos.

<b>Ensaio</b>	<b>Polaridade MIG/MAG</b>	<b>Corrente TIG</b>
1	Positivo	100
2	Positivo	0
11	Negativo	0
4	Positivo	150
5	Positivo	200
12	Negativo	50
7	Positivo	50
15	Negativo	150
9	Negativo	200
10	Negativo	100

Fonte: (Dados da pesquisa)

Com os dados da aquisição dos sinais elétricos obtiveram-se os dados relacionados à média, valor eficaz (RMS) dos sinais e potência instantânea média de cada processo. Para os experimentos pelo processo MIG/MAG convencional, tem-se os dados relacionados a seus sinais nas Tabelas 15 e 16, e seus oscilogramas nas Figuras 37 e 38, onde observa-se duas imagens sendo elas: uma referente a todo o processo e outra com o comportamento dos sinais com o processo MIG/MAG em operação durante 200 ms. Assim como nos testes preliminares para o processo TIG-MIG/MAG foram definidas três zonas de análise dos sinais e plotados os oscilogramas referentes para cada um dos experimentos. Nas Figuras 39 e 40 vê-se os oscilogramas do processo TIG-MIG/MAG e observa-se quatro imagens sendo elas: uma referente a todo o processo, duas demonstrando as zonas de transição dos sinais, sendo a primeira o momento em que o arco MIG/MAG entra em operação e a segunda o momento em que o arco TIG sai de operação, e mais um com o comportamento dos sinais com o processo TIG-MIG/MAG em operação.

## 5.2 Resultados e discussões

### 5.2.1 Processo MIG/MAG

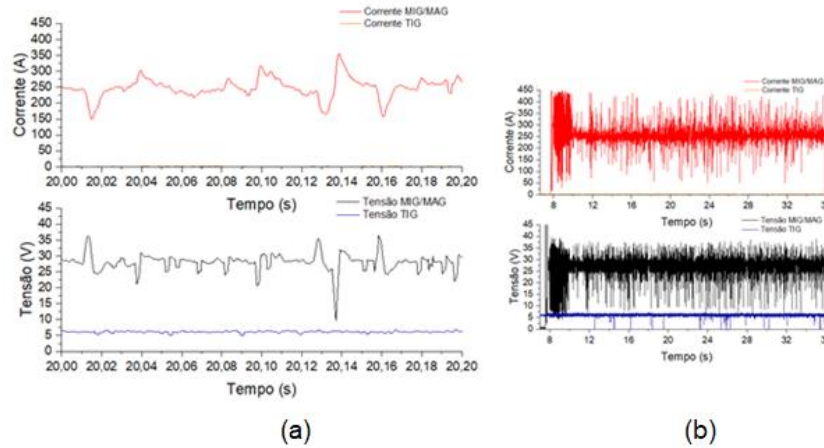
Os testes 2 e 11 são relacionados ao processo MIG/MAG convencional, polaridades positiva e negativa respectivamente. Para os mesmos, foram analisados os valores médios, RMS e potência instantânea média dos sinais de corrente e tensão de soldagem vistos nas Tabela 15 e 16 e os oscilogramas nas Figuras 37 e 38.

Tabela 15 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com MIG/MAG convencional.

<b>MIG/MAG convencional (polaridade inversa)</b>				
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Potência Inst. Média MIG/MAG (W)</b>	<b>Potência Inst. Média TIG (W)</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	27,94	28,04		
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	249,86	251,79		
<b>Tensão TIG (V)</b>	6,17	6,18	6977,79	2,66
<b>Corrente TIG (A)</b>	0,43	0,54		

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 37 – Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem MIG/MAG com polaridade inversa. (a) comportamento dos sinais em 200 ms. (b) comportamento dos sinais em todo processo.



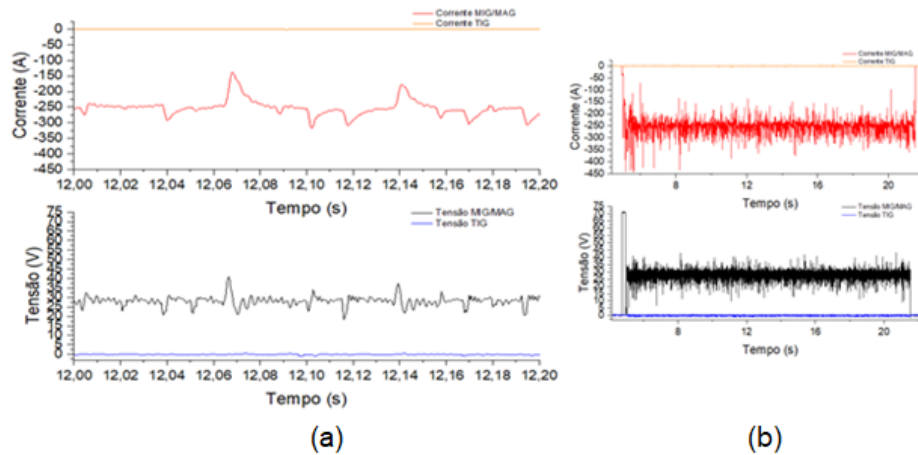
Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 16 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com MIG/MAG direta.

<b>MIG/MAG direto (polaridade direta)</b>				
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Potência Inst. Média MIG/MAG (W)</b>	<b>Potência Inst. Média TIG (W)</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	28,11	28,04		
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	-250,21	-251,29		
<b>Tensão TIG (V)</b>	-0,04	0,52	-7051,04	-0,01
<b>Corrente TIG (A)</b>	0,34	0,84		

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 38 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem MIG/MAG com polaridade direta. (a) comportamento dos sinais em 200 ms. (b) comportamento dos sinais em todo processo.



Fonte: Dados da pesquisa)

Os dados e oscilogramas dos experimentos demonstraram características de uma transição goticular, podendo ser confirmada por seus valores de tensão e corrente médios e RMS. Observa-se também que para ambos calculou-se a potência instantânea média, indicada por Nascimento et. al (2007) como um dos melhores métodos de se calcular potência e verificou-se que os ensaios se encontram em um mesmo nível de energia.

### 5.2.2 Processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta

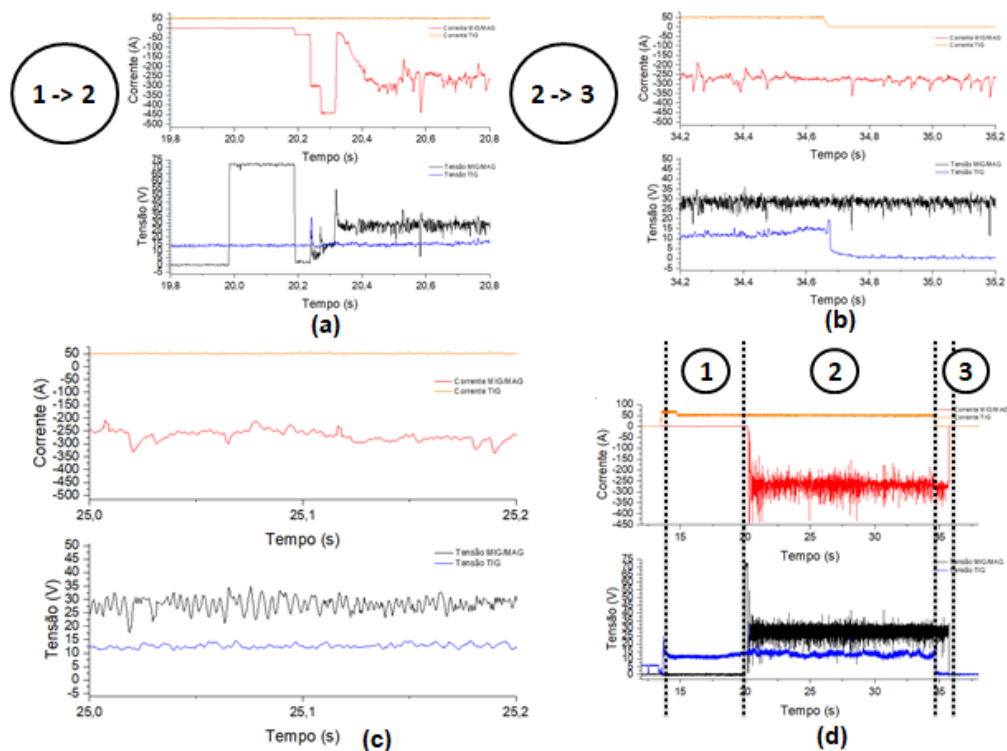
Para os experimentos do processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta analisou-se o comportamento dos sinais em três diferentes regiões, a primeira região onde tem-se a operação da parte TIG do processo, a segunda onde os dois processos operam simultaneamente e a terceira região onde tem-se somente a parte MIG/MAG do processo. A Tabela 17 mostra os dados relacionados aos sinais para TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com a corrente TIG a 50 A. A Figura 39 o oscilograma referente ao experimento.

Tabela 17 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com a  $I_{TIG}$  a 50 A.

TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com a $I_{TIG}$ a 50 A						
	1		2		3	
	Média	RMS	Média	RMS	Média	RMS
Tensão MIG/MAG (V)	0,02	0,27	28,05	28,18	28,11	28,19
Corrente MIG/MAG (A)	0,51	0,62	-263,75	264,71	-277,97	278,42
Tensão TIG (V)	11,72	11,73	13,11	13,15	0,41	0,65
Corrente TIG (A)	50,88	50,93	51,06	51,09	0,28	0,45
Potência Instantânea Média (W)	MIG/MAG	TIG	MIG/MAG	TIG	MIG/MAG	TIG
	0,01	596,38	-7401,98	669,71	-7815,72	0,11

Fonte: (Dados da pesquisa).

Figura 39 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e  $I_{TIG}$  a 50 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.



Fonte: (Dados da pesquisa)

O resultado do experimento seguiu os indícios identificados nos testes preliminares onde ao se inserir o processo MIG/MAG os dados se ajustaram para adequar a diferença de potencial da teoria delineada por Matthles e Kohler (2002). Os dados de tensão TIG tiveram um leve aumento em suas intensidades ao se inserir o processo MIG/MAG. Também através da observação do oscilograma vem-se que os dados de tensão TIG oscilam levemente a partir do momento em que o processo MIG/MAG entra em operação, este fato pode ser explicado pelo fato de que para manter a estabilidade em processos onde se utilizam correntes mais altas necessita-se de maiores níveis de tensão (GARCIA & SCOTTI, 2011).

Os dados dos experimentos relacionados ao processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e intensidade de  $I_{TIG}$  a 100, 150 e 200 A, seguem o mesmo comportamento observado para TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e  $I_{TIG}$  a 50 A, estes podem ser vistos no Apêndice II. Os resultados mostraram que esta configuração pode resultar em uma soldagem estável, sendo que o experimento onde a intensidade de corrente TIG se encontrava em 100 A, foi o que se mostrou mais estável. Apesar dos dados de média e valor eficaz demonstrarem que a partir do momento em que se desliga o processo TIG a intensidade de corrente aumenta, nos oscilogramas pode-se identificar uma suavidade dos dados.

### *5.2.3 Processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional*

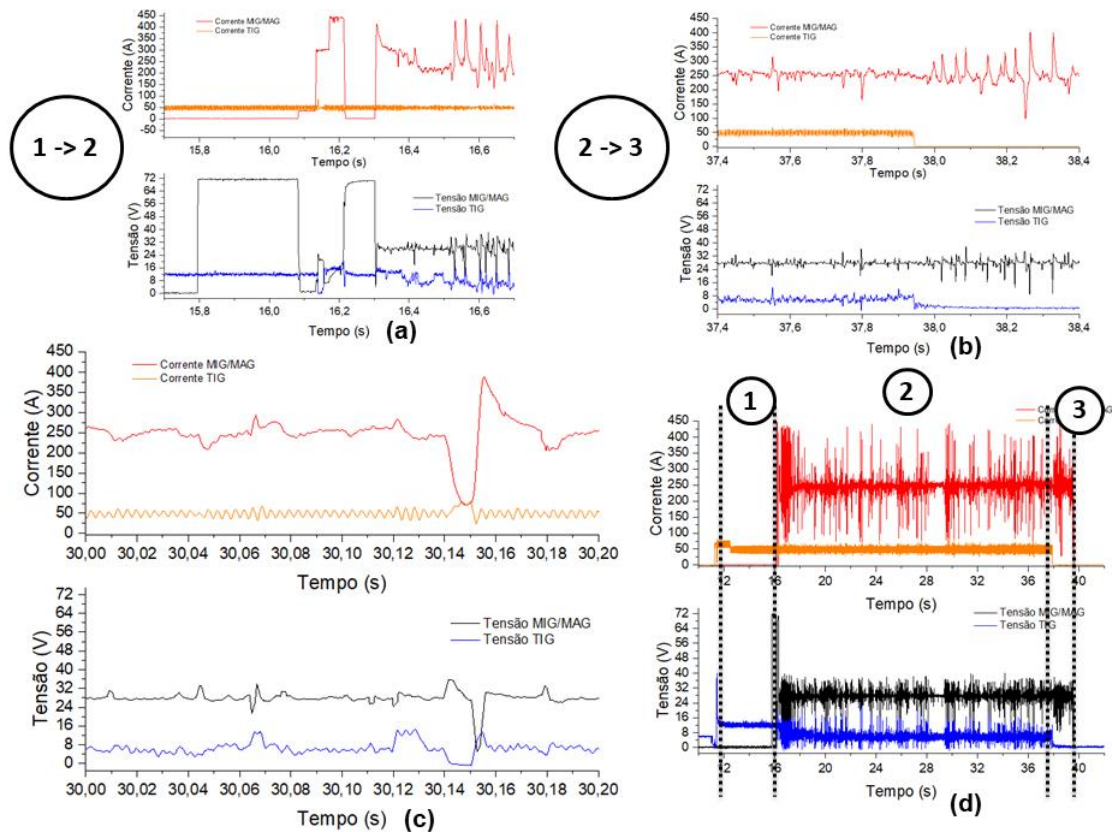
Nos experimentos do processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional (indireta) e a parte TIG na polaridade direta, também analisou-se o comportamento dos sinais em três diferentes regiões, a primeira região onde tem-se a operação da parte TIG do processo, a segunda onde os dois processos operam simultaneamente e a terceira região onde tem-se somente a parte MIG/MAG do processo. A Tabela 18 mostra os dados relacionados aos sinais para TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com a  $I_{TIG}$  a 50 A. A Figura 40 o oscilograma referente ao experimento.

Tabela 18 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com  $I_{TIG}$  a 50 A.

<b>TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e <math>I_{TIG}</math> a 50 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	0,23	0,57	27,73	27,89	27,74	28,10
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,44	0,76	248,20	249,71	247,62	253,26
<b>Tensão TIG (V)</b>	12,00	12,10	5,92	6,35	0,63	0,90
<b>Corrente TIG (A)</b>	48,89	53,52	49,02	50,83	0,41	0,90
<b>Potência Instantânea Média (W)</b>	MIG/MAG	TIG	MIG/MAG	TIG	MIG/MAG	TIG
	0,10	608,91	6881,62	296,33	6858,18	0,25

Fonte: (Dados da pesquisa).

Figura 40 – Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e  $I_{TIG}$  a 50 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 2000 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.



Fonte: (Dados da pesquisa)

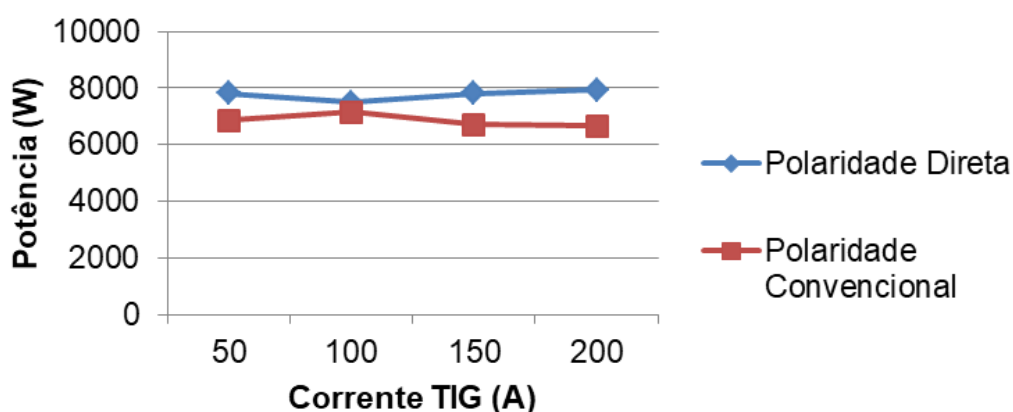
Para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e  $I_{TIG}$  a 50 A, vê-se que os dados também seguiram os indícios identificados nos testes preliminares e a teoria de Matthles e Kohler (2002). Esse balanço de energia pode ser identificado pelos dados de média e valor eficaz que demonstram que a partir do momento em que o arco MIG/MAG é inserido a intensidade de tensão TIG diminui, e no momento em que se retira o arco TIG a intensidade de corrente MIG/MAG diminui.

Para os demais experimentos relacionados ao processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional o mesmo comportamento foi observado, seus dados e oscilogramas podendo ser vistos no Apêndice II. Esta configuração também demonstrou resultar em uma soldagem estável.

#### 5.2.4 Análise de potência

O gráfico da Figuras 41 mostra os valores relacionados a potência instantânea média dos experimentos no momento em que somente o processo MIG/MAG se encontra em operação, percebe-se que em todos os ensaios foi mantida uma média de energia de soldagem aproximadamente igual no todo, mostrando que a relação velocidade de alimentação/velocidade de soldagem conseguiu manter um controle de energia em cada um dos grupos de experimentos. Esta mesma média de energia de soldagem torna possível a comparação dos resultados encontrados com relação a geometria de solda e capacidade produtiva e averiguar os efeitos das variáveis no processo analisado.

Figura 41 - Gráfico de potência instantânea média para o processo MIG/MAG.

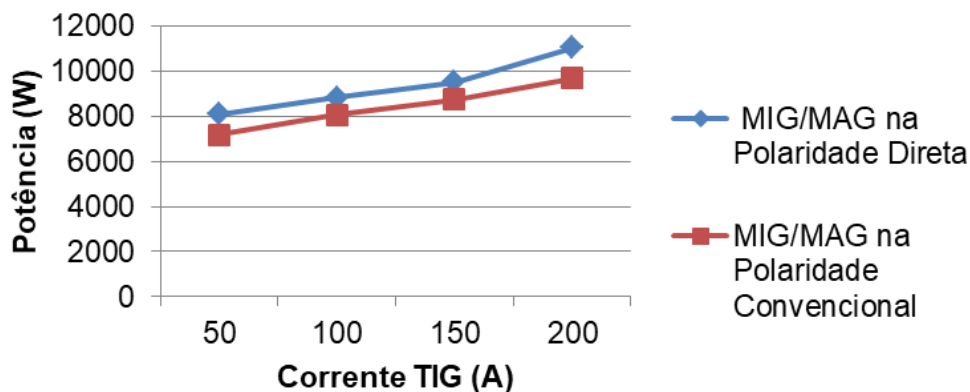


Fonte: (Dados da pesquisa)

A Figura 42 mostram os valores relacionados a potência instantânea média dos experimentos no momento em que o processo TIG-MIG/MAG se encontra em operação, podemos perceber que o arco TIG contribui no aumento da potência de soldagem uma vez

que a intensidade de corrente TIG aumenta em cada um dos níveis do fator, assim, a tendência de crescimento de potência é a mesma pra as duas polaridade de eletrodo MIG/MAG, mantendo o controle de energia de soldagem dos experimentos.

Figura 42 - Gráfico de potência instantânea média do processo TIG-MIG/MAG.



Fonte: (Dados da pesquisa)

### 5.3 Considerações finais

Com os parâmetros e métodos utilizados nestes ensaios pode-se concluir que :

- Os experimentos demonstraram, através da análise dos dados elétricos de tensão e corrente, uma soldagem estável.
- Os experimentos realizados pelo processo TIG-MIG/MAG demonstraram que no momento de inserção do arco MIG/MAG no processo, os sinais realinharam suas intensidades a fim de estabilizar o processo.
- No processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta os dados de tensão TIG aumentaram suas intensidades no momento de inserção do arco MIG/MAG.
- No processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional os dados de tensão TIG diminuíram suas intensidades no momento de inserção do arco MIG/MAG.
- Os resultados de potência de ambas as configurações demonstraram similaridades comprovando que os ensaios foram realizados em uma mesma energia de soldagem.

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE DE CAPACIDADE PRODUTIVA

Este Capítulo apresenta uma avaliação da capacidade produtiva em termos de taxa de deposição, fusão e rendimento de deposição dos experimentos, a fim de identificar como a polaridade MIG/MAG e intensidade de corrente TIG exercem influencia nos níveis de deposição e fusão da solda.

#### 6.1 Procedimento experimental

Para a análise da capacidade produtiva dos experimentos, realizou-se um estudo relacionado à taxa de deposição e quantidade de respingos para as condições soldadas. Para tanto, as amostras foram pesadas em dois diferentes momentos, antes da soldagem com a chapa limpa e seca e depois da soldagem com os respingos e silicatos formados sendo retirados. Utilizou-se uma balança digital com capacidade máxima de 3 kg e resolução de 0,01 g. Os dados de tempo de arco MIG/MAG aberto foram adquiridos através do sistema de aquisição de dados e a velocidade de alimentação do arame adquirida pela configuração da máquina de soldagem.

Os parâmetros utilizados nos ensaios analisados neste capítulo são os experimentos descritos no Capítulo 5. Para os cálculos de taxa de deposição e taxa de fusão foram utilizadas as equações descritas por Marques e Modenesi (2014).

$$T_d = \left( \frac{M_f - M_i}{T_{ab}} \right) \left[ \frac{g}{min} \right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:  $T_d$  – taxa de deposição [g/min];  $M_f$  – massa final [g];  $M_i$  – massa inicial [g];  $T_{ab}$  – tempo de arco aberto (durante a soldagem do cordão) [min];

$$\eta_D = \left( \frac{T_d}{T_f} \right) 100[\%] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:  $\eta_D$  – rendimento de deposição;  $T_f$  – taxa de fusão [g/min], obtida a partir da equação 3 a seguir.

$$T_f = \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot V_{alim} \cdot \rho \left[ \frac{g}{min} \right] \quad \text{Equação 2}$$

Onde:  $V_{alim}$  – velocidade de alimentação do arame (m/min) e  $\rho$  – massa específica do arame (definida como 7813953,488 g/m<sup>3</sup>, calculada através de medição com micrômetro e pesagem em balança de precisão do arame utilizado nos experimentos).

A partir destes cálculos tem-se na Tabela 19 os resultados de taxa de deposição, fusão e rendimento de deposição, os valores utilizados nos cálculos podem ser observados no Apêndice III.

Tabela 19 - Taxas de deposição, fusão e rendimentos dos experimentos.

Polaridade	I <sub>TIG</sub>	T <sub>d</sub> = Taxa de deposição (g/min)	T <sub>f</sub> = Taxa de Fusão (g/min)	$\eta_D$ = Rendimento de deposição (%)
<b>Conv.</b>	0	60,42	67,21	89,91
	50	62,5	67,21	92,99
	100	62,65	67,21	93,22
	150	64,99	67,21	96,70
	200	65,15	67,21	96,94
<b>Direta</b>	0	86,69	100,81	85,99
	50	78,09	100,81	77,46
	100	81,01	100,81	80,36
	150	82,36	100,81	81,70
	200	81,91	100,81	81,25

Fonte: Dados da pesquisa)

## 6.2 Resultados e discussões

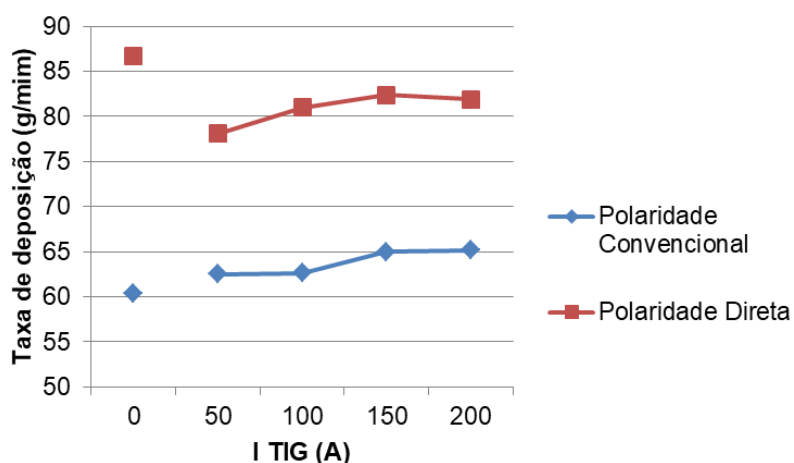
### 6.2.1 Taxa de deposição

A partir dos dados da tabela observamos uma diferença significativa nas taxas de rendimento, deposição e fusão dos experimentos, vale ressaltar que foram usados os mesmos parâmetros para os processos TIG-MIG/MAG e MIG/MAG, sendo assim, a influencia da corrente, gás de proteção, consumível e DBCP não serem analisadas. Os

experimentos realizados na polaridade direta demonstraram maiores taxas de deposição e fusão que podem ser explicados a partir das particularidades da polaridade direta do processo MIG/MAG visto nos estudos de Talkington (1998) e Souza, Rezende e Scotti (2009).

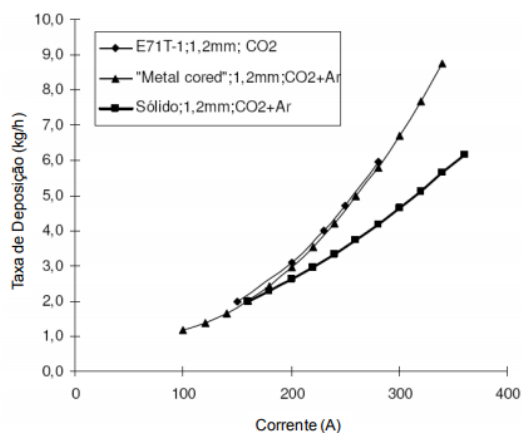
Na Figura 43 observamos que para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional, quanto maior a intensidade de  $I_{TIG}$ , maior a taxa de deposição, para os parâmetros analisados. Dentre os níveis de  $I_{TIG}$  analisados, o que demonstrou uma maior taxa foi de 200 A, nível maior que o encontrado com processo MIG/MAG. Este dado mostra uma tendência de que o arco TIG nas condições analisadas contribui na taxa de fusão do processo. Para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta, observa-se o mesmo comportamento crescente, sendo a maior taxa no nível de 150 A. Quando comparado os níveis do processo TIG-MIG/MAG com o processo MIG/MAG vemos que o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta tem maiores deposições que o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional. Na Figura 44 tem-se um gráfico de taxas de deposição x corrente para o processo MIG/MAG, que demonstra que apesar dos dados estarem em níveis diferentes todos os experimentos estão, segundo Widgery (1994), dentro da faixa esperada para o tipo de arame e gás de proteção utilizados nas soldagens.

Figura 43 - Taxa de deposição x Corrente utilizada nos experimentos.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 44 – Taxa de deposição para arames e gases de proteção em função do aumento da corrente para o processo MIG/MAG.



Fonte: (WIDGERY, 1994).

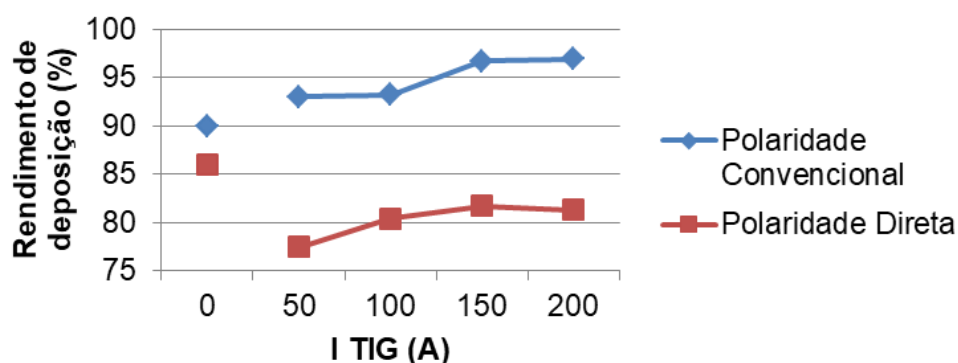
### 6.2.2 Taxa de fusão

Através dos dados da Tabela 19 observa-se que os experimentos na polaridade direta demonstram uma taxa de fusão significativamente maior que para a polaridade convencional, sendo elas, 67,21 g/mim para a polaridade convencional e 100, 81 g/mim para a polaridade direta. Este fato se dá pela característica do processo direto que concentra a maior parte do calor do arco no arame fazendo com que haja uma fusão maior de material mesmo com a utilização dos mesmos parâmetros. Outro ponto que explica esta diferença na taxa de fusão de material se dá por razão da utilização de uma maior velocidade de alimentação de arame para os experimentos na polaridade direta, esta velocidade foi ajustada afim de manter um mesmo nível de energia de soldagem para todos os experimentos, como os consumíveis utilizados foram os mesmos, esta mudança na velocidade de alimentação de arame pode ter influenciado uma parcela do cálculo.

### 6.2.3 Rendimento de deposição

A Figura 45 mostra o rendimento de deposição dos experimentos.

Figura 45 - Rendimento de deposição x Corrente utilizada nos experimentos.



Fonte: Dados da pesquisa)

Atráves da Figura 45 vemos as taxas de rendimento de deposição dos experimentos, o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional demonstra as melhores taxas de rendimento de deposição e a medida que se aumenta a  $I_{TIG}$  maiores são as taxas. O processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta demonstra menores taxas de rendimento de deposição que podem ser explicadas pelo fato de que a polaridade direta do processo MIG/MAG gera maiores quantidades de respingos e apesar dos dados estarem em menores níveis ainda se mostram em níveis aceitáveis para a polaridade direta entre 75% e 85% de rendimento. Apesar do processo TIG-MIG/MAG na polaridade direta demonstrar menores taxas de rendimento de deposição, as taxas de fusão e deposição se mostram maiores tornando o processo viável em termos de capacidade produtiva.

### 6.3 Considerações finais

Para as condições utilizadas nestes experimentos pode-se concluir que:

- O processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta tem maiores taxas de deposição que na configuração convencional, porém estas taxas ainda são menores que o processo MIG/MAG direto.
- A taxa de fusão para o processo direto é maior que para o processo convencional, dado que corrobora com dados encontrados na literatura.
- Mesmo com melhores taxas de deposição e fusão o processo direto tem rendimentos de deposição menores que o processo convencional porém ainda em níveis aceitáveis.

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISE GEOMETRIA DOS CORDÕES

Este Capítulo apresenta os resultados obtidos com os experimentos de soldagem dos cordões realizados pelo processo TIG-MIG/MAG e pelo processo MIG/MAG convencional. Primeiramente é apresentada uma análise dos aspectos visuais dos cordões, em seguida a análise de variância dos fatores e níveis analisados e por fim uma avaliação da geometria de solda relacionando as variáveis de entrada com os parâmetros de resposta analisados.

#### 7.1 Procedimento experimental

As amostras utilizadas para a análise de geometria dos cordões são os ensaios descritos no Capítulo 5 que seguiram os parâmetros demonstrados nas Tabelas 13 e 14. Realizou-se uma inspeção visual observando aspectos como: descontinuidades, salpicos, respingos e formato do cordão.

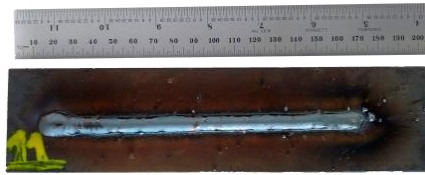
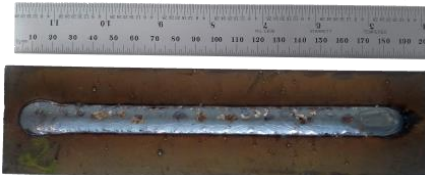
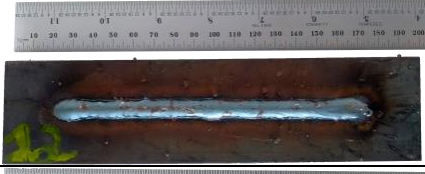

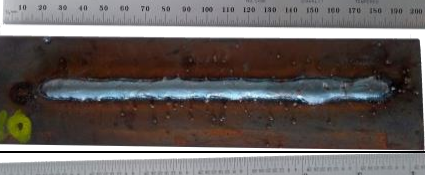


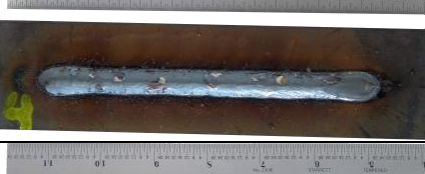


Os parâmetros centrais de investigação foram a polaridade direta do processo MIG/MAG e a intensidade de  $I_{TIG}$ , sendo que em todas as configurações utilizadas o eletrodo TIG permaneceu na polaridade direta (eletrodo negativo). Assim, a análise macrográfica buscou identificar nos cordões do processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta melhor qualidade e acabamento do cordão sendo esperado cordões com maiores penetrações, menores reforço e largura dentro dos padrões literários, quando comparados com cordões do processo MIG/MAG direto. Realizou-se uma análise de variância relacionando as variáveis de resposta, sendo elas, reforço, penetração, largura, área fundida e ângulo de contato do cordão, com os parâmetros de controle e examinou-se gráficos construídos com resultados de interação entre as variáveis de controle e resposta.

## 7.2 Resultados e discussões

### 7.2.1 Análise de aspectos visuais

A Tabela 20 ilustra os aspectos visuais dos cordões realizados. Observou-se que os cordões realizados pelo processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta apresentaram instabilidades em seu formato e uma maior quantidade de respingos. Resultado similar, para o processo MIG/MAG, foi observado por Souza, Resende e Scotti (2009), fato este devido a características do processo na polaridade direta. Nota-se também que a  $I_{TIG}$  exerce uma pequena influência na quantidade de respingos, quanto maior a intensidade de  $I_{TIG}$  menores as quantidades de respingos encontradas. Esta quantidade de respingos encontrada condiz com os resultados de rendimento de deposição discutidos no tópico 6.2.3, onde para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta uma maior intensidade de  $I_{TIG}$  melhora o rendimento.

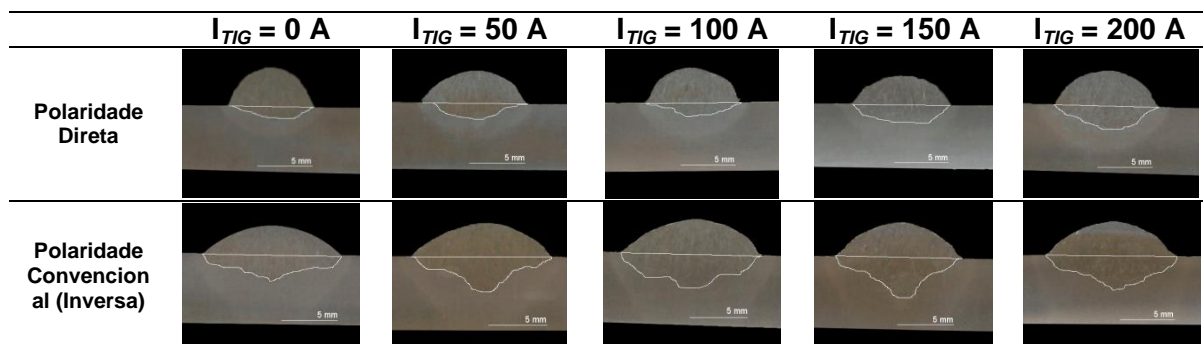
Tabela 20 - Imagens das superfícies das amostras.

	Polaridade Direta	Polaridade Convencional (Inversa)
$I_{TIG} = 0$ A		
$I_{TIG} = 50$ A		
$I_{TIG} = 100$ A		
$I_{TIG} = 150$ A		
$I_{TIG} = 200$ A		

Fonte: (Dados da pesquisa)

Na Tabela 21 tem-se imagens das seções transversais dos experimentos. Um aspecto observado foi a convexidade dos cordões realizados pelo processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta, quanto maior a intensidade de  $I_{TIG}$  menor a convexidade dos cordões, este assunto será abordado mais detalhadamente nos tópicos a seguir. As características do formato de penetração dos experimentos também demonstra diferenças evidentes em sua secção transversal, uma vez que para os experimentos realizados com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional a penetração apresenta um formato tipo taça (*'finger like'*), enquanto que com o eletrodo MIG/MAG polaridade direta apresenta formato mais largo e parabólico. Murray e Scotti (1999) relacionam formato da penetração com a transferência de calor, onde o chamado *'momentum'* das gotas levam mais energia ao fundo da poça de fusão. Por características da polaridade do processo MIG/MAG tem-se que para o modo convencional a transferência de calor para a peça é maior levando o formato da penetração adquirir tais características que o modo direto não demonstra.

Tabela 21 - Imagens de secções transversais dos experimentos. Chapa com espessura de 6,35 mm.



Fonte: (Dados da pesquisa)

### 7.2.2 Análise de variância

Após a realização de macrografia dos cordões os dados obtidos foram tratados com o software Minitab, seus resultados podem ser observados na Tabela 22 e Figura 46, as medidas utilizadas para formação da Tabela 22 podem ser vistas no Apêndice IV. Para a análise de variância considerou-se um intervalo de confiança mínimo de 95%. Este intervalo corresponde a um nível de significância, igual ou inferior a 0,05. Assim, os parâmetros que indicarem o valor P igual ou inferior a 0,05 apresentam influência significativa na resposta de saída.

Tabela 22 - Resultados da análise metalográfica.

Polaridade	I <sub>TIG</sub>	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área fundida (mm <sup>2</sup> )	Ângulo (°)
<b>Polaridade Convencional (Inversa)</b>	0	2,67	2,56	12,56	18,89	43,45
	50	2,76	2,76	11,62	15,80	50,73
	100	2,87	3,00	12,23	20,48	40,37
	150	3,24	3,20	11,46	19,06	44,74
	200	3,13	3,44	12,06	21,22	42,11
<b>Polaridade Direta</b>	0	3,28	1,30	7,51	5,47	72,95
	50	2,84	1,33	8,69	6,05	61,51
	100	2,87	1,28	8,36	5,75	59,10
	150	2,74	1,49	9,02	10,10	57,48
	200	3,06	2,01	9,32	10,78	54,69

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 46 - Resultados da análise de Variância.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Os resultados de análise de variância dos experimentos finais demonstraram que a I<sub>TIG</sub> não exerce influência significativa em quase nenhuma das variáveis de resposta sendo significativa somente para a penetração, enquanto que a polaridade MIG/MAG influencia significativa em todas as variáveis respostas exceto para o reforço, tendo maior significância para a penetração e zona fundida onde os resultados demonstram que a probabilidade da polaridade MIG/MAG influenciar no resultado é de 100%.

### 7.2.3 Análise das variáveis respostas

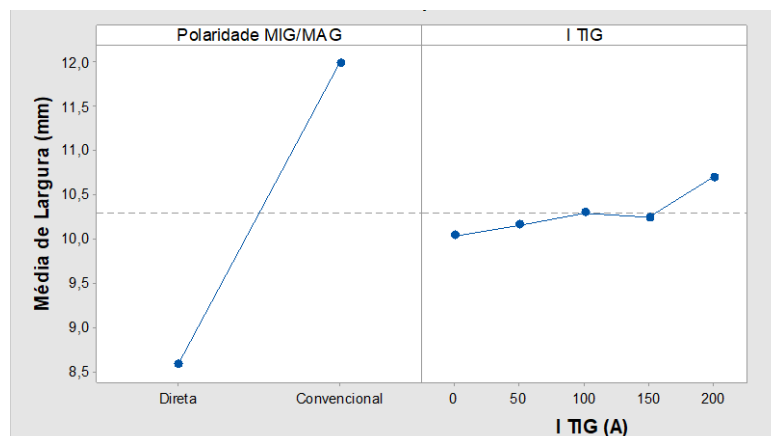
### 7.2.3.1 Largura

Os aspectos de largura são observados nas Figuras 47 e 48, para os efeitos principais, tem-se que para a polaridade convencional os níveis de largura são maiores que para a polaridade direta, característica própria do processo MIG/MAG como visto no estudo de Talkington (1998). O resultado da análise de variância indica que apenas a polaridade MIG/MAG tem influência significativa nos resultados, o que corrobora com o estudo de Teixeira (2011) onde a  $I_{TIG}$  também não demonstrou significância nos parâmetros analisados.

Para as interações entre os fatores a mudança de polaridade e inserção de  $I_{TIG}$  causa efeitos contrários em cada uma das polaridades. O processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional demonstrou menores valores de largura que o processo MIG/MAG convencional. O estudo de Schneider et al. (2017) constata que para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional a  $I_{TIG}$  não demonstrou os melhores resultados com relação a largura, fato que pode ter sido influenciado por outros fatores do processo.

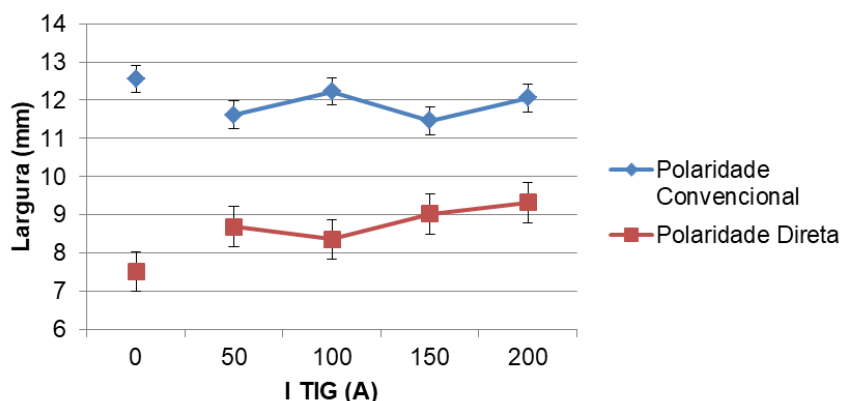
Apesar da  $I_{TIG}$  não demonstrar influência no processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional, no TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta a largura do cordão aumenta de acordo com a inserção de  $I_{TIG}$ . Resende & Scotti (2017) identificaram que o arco híbrido aumenta a superfície de contato do arco com a peça tendendo a proporcionar uma maior molhabilidade e por consequência maior largura no cordão. O balanço de calor proporcionado pela associação dos processos, uma vez que o MIG/MAG direto concentra seu calor no eletrodo e o TIG direto concentra seu calor na peça, fazendo com que o cordão seja formado de forma a utilizar a maior taxa de deposição do processo MIG/MAG e a maior transferência de calor a peça do processo TIG.

Figura 47 - Gráfico de efeitos principais para a largura.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 48 - Gráfico de interação para a largura.



Fonte: (Dados da pesquisa)

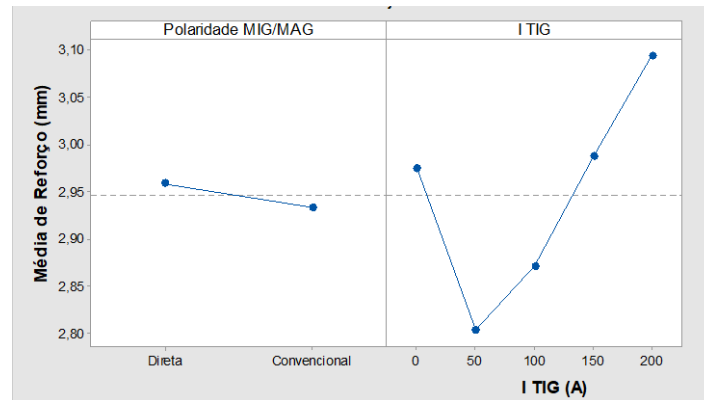
### 7.2.3.2 Reforço

Na Figura 49 é apresentado o efeito principal das variáveis respostas de acordo com cada nível dos fatores analisados e na Figura 50 tem-se a interação dos resultados. Apesar da análise de variância mostrar que este aspecto não sofre influencia dos fatores analisados os resultados demonstram que a mudança de polaridade MIG/MAG e a inserção de  $I_{TIG}$  exercem certo impacto no reforço.

Como para a largura a mudança de polaridade demonstrou comportamentos distintos, para Resende & Scotti (2017) este fato é relacionado, pois, com a mudança de uma variável a outra segue sua tendência, assim, uma vez que se têm cordões mais largos a tendência do reforço é diminuir e vice-versa. Portanto, para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional, o reforço apresentou maiores níveis que o processo MIG/MAG convencional.

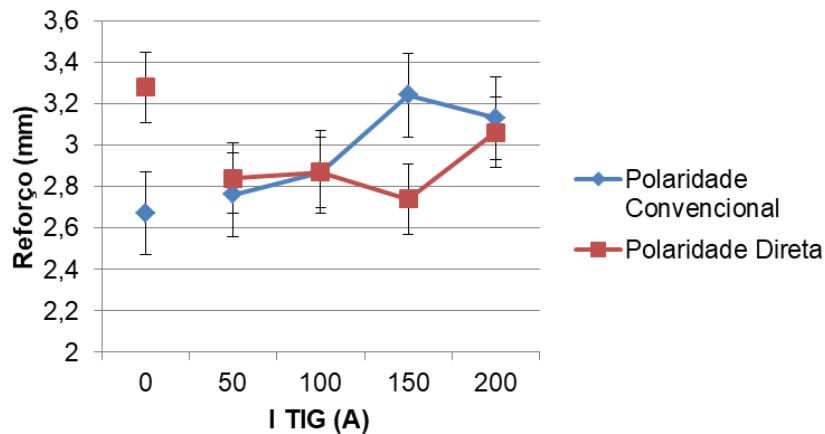
O processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta apresenta menores níveis de reforço que o MIG/MAG direto. As melhores medidas de reforço foram encontradas nos níveis intermediários de  $I_{TIG}$  assim como no estudo de Schneider et al. (2017), em seu trabalho a  $I_{TIG}$  se mostrou uma variável significativa para o resultado. Para a polaridade direta utilizou-se uma velocidade de soldagem maior que para a polaridade convencional (fator que segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009) influencia a formação do reforço), a fim de manter a mesma energia de soldagem, fato este que pode ter auxiliado na diferença de médias do reforço. Outro fator que também pode ter contribuído para médias de reforço menores na polaridade direta é a quantidade de respingos e salpicos identificados nas soldas.

Figura 49 - Gráfico de efeitos principais para o reforço.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 50 - Gráfico de interação para o reforço.



Fonte: (Dados da pesquisa)

### 7.2.3.3 Penetração

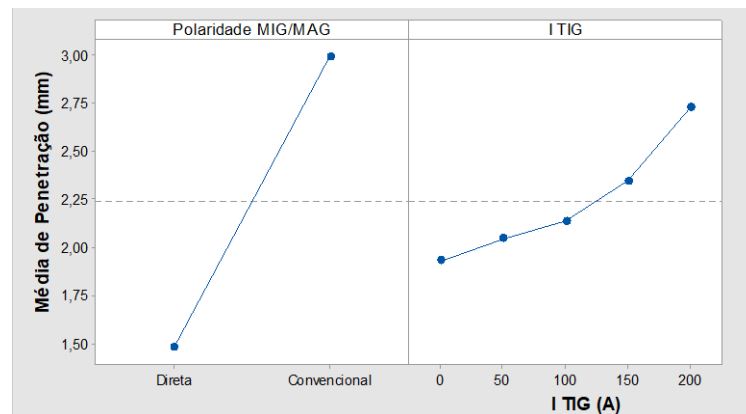
As Figuras 51 e 52 apresentam os efeitos observados em relação à penetração de soldagem. A análise de variância demonstrou que esta variável resposta é afetada pelos dois parâmetros de entrada estudados, sendo que a polaridade MIG/MAG é um fator que influencia mais fortemente os resultados. É visto nas médias dos efeitos principais que na polaridade convencional a penetração é duas vezes maior que para a polaridade direta. Este fato se dá pela característica do processo MIG/MAG que na polaridade direta gera cordões com pouca penetração (TALKINGTON, 1998). Com relação à  $I_{TIG}$  tem-se a penetração aumentando à medida que a intensidade de  $I_{TIG}$  aumenta.

A análise de interação das variáveis mostra que para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional à medida que se insere  $I_{TIG}$  a penetração aumenta. Um fator que afeta a penetração é a velocidade de soldagem, para a polaridade

convencional utilizou-se uma menor velocidade de soldagem o que pode ter afetado em menor escala o aumento da penetração.

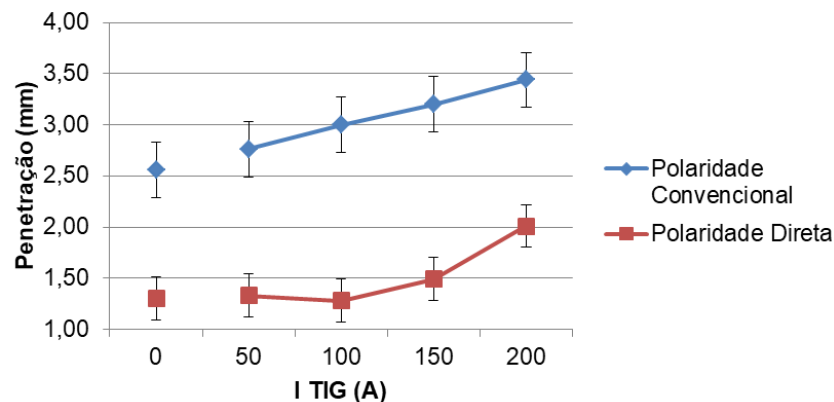
Para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta a inserção de  $I_{TIG}$  aumentou a penetração mais significativamente a partir do nível de 100 A aumentando seu grau conforme o crescimento da corrente, fato que condiz com dados identificados por Rodrigues (2007), onde seus resultados mostraram que para o processo MIG/MAG, operando em modo goticular, maiores correntes geram uma maior movimentação de gotas levando a um aumento na penetração. Kanemaru et al. (2013) também identificou que se aumentando a  $I_{TIG}$  há um aumento da penetração e que quando a  $I_{TIG}$  se encontra em um nível muito baixo esta variável não influencia no valor de penetração.

Figura 51 - Gráfico de efeitos principais para a penetração.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 52 - Gráfico de interação para a penetração.



Fonte: (Dados da pesquisa)

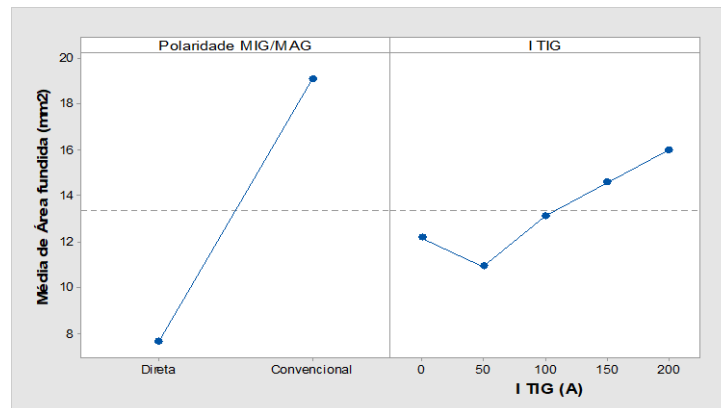
#### 7.2.3.4 Área Fundida

As áreas fundidas, medidas abaixo da linha de referencia da chapa, dos experimentos são ilustradas nas Figuras 53 e 54, ao se observar os efeitos principais tem-se que para a polaridade convencional, em média, a área fundida é mais que o dobro da polaridade direta, fato confirmado pela análise de variância que indica que a polaridade MIG/MAG exerce forte influencia no parâmetro.

A análise de  $I_{TIG}$  em aspectos gerais mostra que, em média, a intensidade de corrente que leva a um aumento da área fundida quando se está acima do nível de 100 A, vale ressaltar que para ambas polaridades foi seguida uma relação velocidade de alimentação/velocidade de soldagem a fim de manter uma mesma taxa de deposição nos cordões realizados.

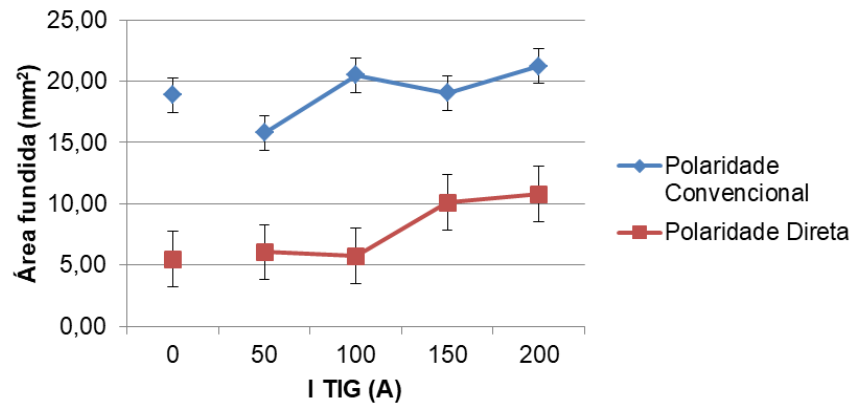
As interações entre os fatores e variáveis demonstram que as duas polaridades apresentam comportamentos parecidos, porém o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta mostra um aumento de área fundida mais significativa a partir da intensidade de 100 A. Para o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta as intensidades de corrente 150 e 200 A fizeram com que a área fundida fosse maior que para os outros experimentos, fato que pode ter sido influenciado pela energia de soldagem desprendida, uma vez que o calor dispensado na soldagem é um dos fatores atuantes na formação da área fundida.

Figura 53 - Gráfico de efeitos principais para a área fundida.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 54 - Gráfico de interação para a área fundida.



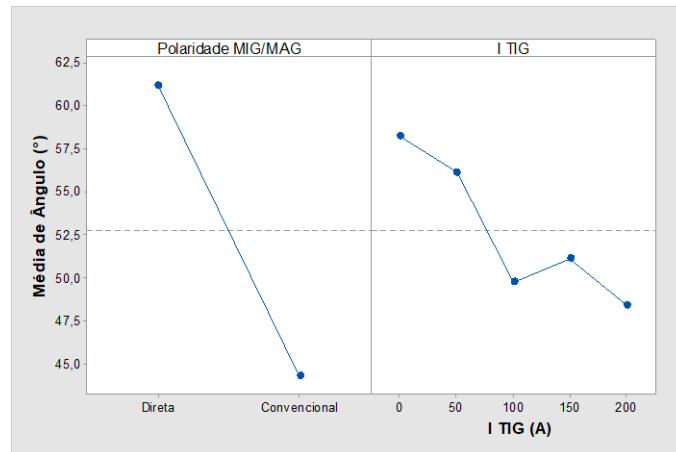
Fonte: (Dados da pesquisa)

### 7.2.3.5 Ângulo de contato

As Figuras 55 e 56 representam os efeitos observados pelos ângulos de contato da solda, estes ângulos determinam a molhabilidade da solda, a literatura mostra que quanto menores os ângulos maior a molhabilidade. Nota-se que, em média, a polaridade convencional apresenta ângulos menores que para a polaridade direta, evidenciando a influencia da polaridade identificada na análise de variância. A intensidade de  $I_{TIG}$ , mesmo não sendo identificada na análise de variância, em média, afeta segundo sua intensidade.

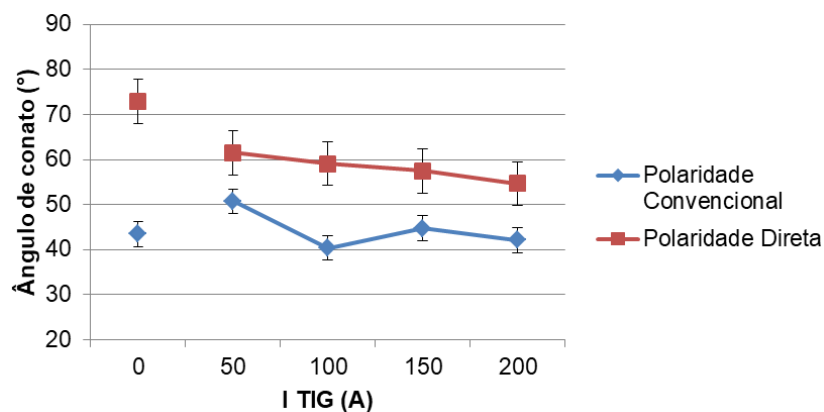
A interação dos níveis mostra que no processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta quanto maior a intensidade de  $I_{TIG}$  menor o ângulo, assim, o incremento de  $I_{TIG}$  diminuiu a convexidade do cordão. A convexidade acentuada é um aspecto que segundo Souza, Resende e Scotti (2009) uma característica da polaridade direta não adequada para a soldagem. Esta diminuição da convexidade na polaridade direta se deve ao aumento na molhabilidade, já discutido anteriormente e agora comprovado através dos ângulos. No processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional também mostra uma diminuição de convexidade, porém, menos acentuada e somente a partir da intensidade de 100 A.

Figura 55 - Gráfico de efeitos principais para os ângulos de contato.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 56 - Gráfico de interação para os ângulos de contato.



Fonte: (Dados da pesquisa)

### 7.3 Considerações finais

Dadas às condições empregadas nos experimentos deste Capítulo pode-se concluir que:

- Conforme os aspectos visuais os cordões realizados com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta demonstram maiores quantidades de respingos que os realizados com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional, seguindo a literatura corrente relacionada ao assunto.

- Para os níveis e fatores avaliados, observou-se que o fator mais influente nos resultados foi à mudança de polaridade do processo MIG/MAG, mesmo o parâmetro não identificado na análise de variância como significativo esta variável apresenta certa influencia.

- Os cordões realizados pelo processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta demonstraram maiores largura, penetrações e áreas fundidas e menores reforços quando comparados com o processo MIG/MAG direto.
- A presença de intensidade de  $I_{TIG}$ , apesar de apresentar significância apenas para a penetração na análise de variância, se mostrou capaz de reduzir a convexidade dos cordões de solda pra ambas as polaridades.

## CONCLUSÕES

Com os resultados adquiridos na análise dos experimentos realizados através dos processos TIG-MIG/MAG e MIG/MAG com diferentes polaridades e diferentes intensidades de  $I_{TIG}$ , nas condições utilizadas neste trabalho pode-se concluir que:

- A bancada de operação de processo e o sistema de aquisição de dados construídos foram capazes de atuar funcionalmente e realizar as atividades para o qual foram projetados.
- Na faixa de corrente e tensão utilizada pode-se obter uma soldagem estável do processo TIG-MIG/MAG.
- Os experimentos realizados pelo processo TIG-MIG/MAG demonstraram que no momento de inserção do arco MIG/MAG no processo, os sinais de corrente e tensão realinharam suas intensidades afim de estabilizar o processo.
- Para os níveis e fatores avaliados observou-se que o fator mais influente nos resultados foi a mudança de polaridade da parte MIG/MAG do processo.
- A variação da polaridade do circuito MIG/MAG no processo de soldagem TIG-MIG/MAG atua sobre a geometria do cordão de solda.
- A intensidade da corrente TIG, no processo de soldagem TIG-MIG/MAG atua sobre a geometria do cordão de solda.
- Conforme os aspectos visuais os cordões realizados pelo processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta demonstram maiores quantidades de respingos, seguindo a literatura corrente relacionada ao assunto.
- O processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta pode gerar cordões com maiores largura, penetrações e áreas fundidas e menores reforços quando comparados com o processo MIG/MAG direto, melhorando as características que tornam o processo MIG/MAG direto menos utilizado.
- A presença do arco TIG foi capaz de reduzir a convexidade dos cordões de solda, independente da polaridade.
- Os resultados indicam que é possível aliar a maior taxa de fusão do processo MIG/MAG na polaridade direta com a menor convexidade do cordão de solda devido ao efeito do arco TIG.

- Mesmo com melhores taxas de deposição e fusão o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta tem rendimentos de deposição menores que o processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional porém ainda em níveis aceitáveis.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros, sugere-se:

- Estudos que avaliem outros parâmetros do processo TIG-MIG/MAG direto como, corrente MIG/MAG, ângulo das tochas, velocidade de soldagem, distância entre eletrodos, entre outros, a fim de definir quais podem afetar nos resultados de soldagem.
- Trabalhos que contemplem uma análise de resistência mecânica, para investigar se as soldas realizadas pelo processo TIG-MIG/MAG possuem variações nos seus limites de resistência.
- Analisar as características cinemáticas e dinâmicas da transferência metálica do processo TIG-MIG/MAG direto em diversas condições de soldagem para entender melhor os fenômenos inerentes ao processo.
- Realizar estudos que avaliem melhor a capacidade produtiva do processo TIG-MIG/MAG com eletrodo MIG/MAG na polaridade direta.
- Realizar estudos relacionados à viabilidade econômica do processo em aplicações industriais.

## REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI JR., A. G.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. São Paulo: Editora Manole, 2008.

AWS. **Welding Handbook - Welding Process**. v. 2, 8. ed. Miami: American Welding Society, 2004.

BARRA, S. R. **Influência do processo MIG/MAG Térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. 2003. 248 f. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

CHEN, J.; WU, C. S.; CHEN, M. A. Improvement of welding heat source models for TIG-MIG hybrid welding process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 16, n. 4, p. 485-493, 10//2014. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612514000590> >. Acesso em 23 de mai. 2017.

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**, v. 243, p. 131-142, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013616304551>> Acesso em 23 de mai. 2017.

CORRÊA, M.A.; Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco. 1999. 92 f. Dissertação de Mestrado. . Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 1999.

CRUZ, J. G.; TORRES, E. M. M.; ALFARO, S. C. A.. A methodology for modeling and control of weld bead width in the GMAW process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 5, p. 1529-1541, 2015.

DING, M.; LIU, 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. **Materials & Design**, v. 88, p. 375-383, 2015.

DYKHNO, I.; DAVIS, R. Joining GMAW and GTAW: Hybrid welding takes on a whole new meaning with new technology developments. **The Fabricator** – Fabricators & Manufacturers Association, 2006.

FORTES, C. **Soldagem MIG/MAG** – traduzido e adaptado, ESAB, Agosto, 2005. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1\\_apostilasoldagemmig\\_mag\\_nova.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoldagemmig_mag_nova.pdf)> Acesso em 29 de jun. 2017.

GARCIA, R. P.; SCOTTI, A. Uma metodologia para análises comparativas da capacidade produtiva entre arames maciços (MIG/MAG) e tubulares (Eletrodo Tubular). **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 2, 2011.

GOHR JR, R. **Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG**. 2002. 138 f. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KANEMARU, S.; SASAKI, T.; SATO, T.; TANAKA, M. Basic study on TIG-MIG hybrid welding process. **Quarterly journal of the Japan Welding Society**, v. 30, n. 1, p. 29-34, 2012.

KANEMARU, S.; SASAKI, T.; SATO, T.; MISHIMA, H.; TASHIRO, S.; TANAKA, M. Study for TIG-MIG Hybrid Welding Process. **Quarterly Journal Of The Japan Welding Society**, v. 31, n. 4, p. 18s-21s, 2013.

KANEMARU, S.; SASAKI, T.; SATO, T.; MISHIMA, H.; TASHIRO, S.; TANAKA, M. Study for TIG–MIG hybrid welding process - Experimental consideration for optimum torch configuration. **Welding in the World**, v. 58, n. 1, p. 11-18, 2014.

KANEMARU, S.; SASAKI, T.; SATO, T.; ERA, T.; TANAKA, M. Study for the mechanism of TIG-MIG hybrid welding process. **Welding in the World**, v. 59, n. 2, p. 261-268, 2015.

LOCATELLI, G.; **Uma ferramenta computacional para o controle de processos de soldagem à arco**. 2007. 160 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. Disponível em: <[http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses\\_dissertacoes/disse\\_2007\\_locatelli.pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses_dissertacoes/disse_2007_locatelli.pdf)> Acesso em 24 de mai. 2013.

MACHADO, M. V. R. **Sistema embarcado sem fio para monitoramento de sinais em soldagem a arco elétrico com abordagem tecnológica**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Algumas equações úteis em soldagem. **Soldagem e Inspeção**, Brasil, v. 19, n. 1, p. 91-102, 2014.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. **Belo Horizonte: Editora UFMG**, p. 494, 2009.

MATTHES, K.; KOHLER, T. Electrical effects and influencing quantities in the case of the hybrid plasma-MIG welding process. **Welding and Cutting**, Feb. 2002. P.87 – 90.

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**, v. 214, n. 11, p. 2417-2424, ISSN 0924-0136, 2014.

MESSLER, Robert W. What's next for hybrid welding?. **Welding Journal**, v. 83, n. 3, p. 30-34, 2004.

MIAO, Y.; XU, X; WU, B.; HAN, D.; ZENG, Y.; WANG, T. Effects of bypass current on arc characteristics and metal transfer behaviour during MIG–TIG double sided arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 224, p. 40-48, 2015.

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**, v. 31, n. 4, p. 22s-25s, 2013.

MODENESI, P.J.. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. 2012. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte.

MODENESI, P. J. A química da formação do cordão na soldagem TIG. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 3, p. 287-300, 2013.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments** . 8. ed. Arizona State University: John Wiley & Sons, 2012. 757 p.

MOREIRA, H. S. **Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MUNCASTER, P. W. **A Practical Guide to TIG (GTA) Welding**. 1.ed. Cambridge: Abington Publishing, 1991. p.12. Disponível em: [https://play.google.com/books/reader?id=aA-kAgAAQBAJ&printsec=frontcover&output=reader&hl=pt\\_BR&pg=GBS.PA3](https://play.google.com/books/reader?id=aA-kAgAAQBAJ&printsec=frontcover&output=reader&hl=pt_BR&pg=GBS.PA3). Acesso em 29 de jun. 2017.

MURRAY, P. E.; SCOTTI, A. Depth of penetration in gas metal arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v.4, n.2, p. 112-117, 1999.

NASCIMENTO, A. D.; BATISTA, M. D. A.; NASCIMENTO, V. C.; SCOTTI, A. Avaliação dos Métodos de Cálculo de Potência Elétrica em Soldagem a Arco e as Conseqüências sobre as Previsões Geométricas, Térmicas e Metalúrgicas da Junta. **Soldagem & Inspeção**, v. 12, n. 2, p. 97-106, 2007.

PANHAN, A. M. **Sistema de Aquisição de Dados e Monitoramento Remoto para Câmaras Frias e Sistemas de Refrigeração**. 2002. 94 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2002.

RAYES, M. E.; WALZ, C.; SEPOLD, G. The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry. **Weld. J**, v. 83, n. 5, p. 147-153, 2004.

RESENDE, A. A.; SCOTTI, A. Influence of current levels, the tilt angle of the torch and the distance between the torch and the part on the geometry of the weld bead using 'Plasma-MIG' with concentric arcs, **Welding International**, 31:10, 747-757, 2017. DOI: 10.1080/09507116.2016.1218628

REUTZEL, E.W.; SULLIVAN, M. J.; MIKESIC, D. A. **Joining pipe with the hybrid laser-GMAW process: weld test results and cost analysis**. PENNSYLVANIA STATE UNIV UNIVERSITY PARK APPLIED RESEARCH LAB, 2006.

RODRIGUES, C. E. A. L. **Avaliação cinemática e dinâmica da transferência metálica na soldagem mig/mag**. 2007. 264 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, 2007.

SCHNEIDER, C. F. **Otimização de um processo de soldagem híbrida TIG-MIG/MAG utilizando o método Taguchi** . 2014. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina,, 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. **Jornal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 1, n. 2, p. 14, 2017.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 6, p. 1406-1413, 2012.

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 e Inspeção (Impresso)**, v. 14, p. 192-198, 2009.

TALKINGTON, John Eric. **Variable polarity gas metal arc welding**. 1998. Tese de Doutorado. The Ohio State University.

TEIXEIRA, G.S. **Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG – MAG em tandem**. 2011. 122 p. Dissertação. ( Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

TOKAR, A. **Efeito dos parâmetros de pulsação no processo TIG sobre a formação da poça de fusão**. 2011. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

TOKAR, A.; PONOMAROV, V. **Influência do ângulo de afiação do eletrodo na formação do cordão em chapas de aço inoxidável**. 2015. 5 p. Artigo (Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. Disponível em: <[http://swge.inf.br/PDF/POSMEC2015-0022\\_027345.PDF](http://swge.inf.br/PDF/POSMEC2015-0022_027345.PDF)>. Acesso em: 13 jun. 2018.

TORRES, E. M. M. **Uma metodologia para modelagem e controle da largura do cordão de solda no processo GMAW**. 2013. 138p. Dissertação ( Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

WIDGERY, D. **Tubular wire welding**. Elsevier, 1994. 145 p.

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. **Materials Letters**, v. 172, p. 146-148, 2016.

ZHANG, Y.; HUANG, J.; YE, Z.; CHENG, Z. An investigation on butt joints of Ti6Al4V and 5A06 using MIG/TIG double-side arc welding-brazing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 27, p. 221-225, 2017.

## APÊNDICE I - Sistema de Aquisição e monitoramento de dados

Os sistemas de aquisição de dados são encarregados do controle da aquisição dos dados, e permitem ao usuário monitorar o processo de levantamento de dados experimentais. Eles armazenam os sinais captados na forma de arquivos que possam ser consultados posteriormente em programas que possibilitem a visualização e edição dos dados, bem como a geração de relatórios e outras documentações impressas (PANHAN, 2002). Em um sistema de aquisição de dados há três componentes básicos: um condicionador de sinais, um conversor de sinais e por fim programas para a aquisição dos dados.

O sistema montado teve como objetivo monitorar sinais elétricos (tensão e corrente) dos processos de soldagem a arco. Na sua construção foram consideradas as seguintes características dos sinais a serem monitorados: amplitude de corrente entre 0 e 400 A, amplitude de tensão entre 0 e 70 V, frequência máxima de interesse de 300Hz. Assim, foram montados dois módulos de aquisição dos dados compostos por:

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

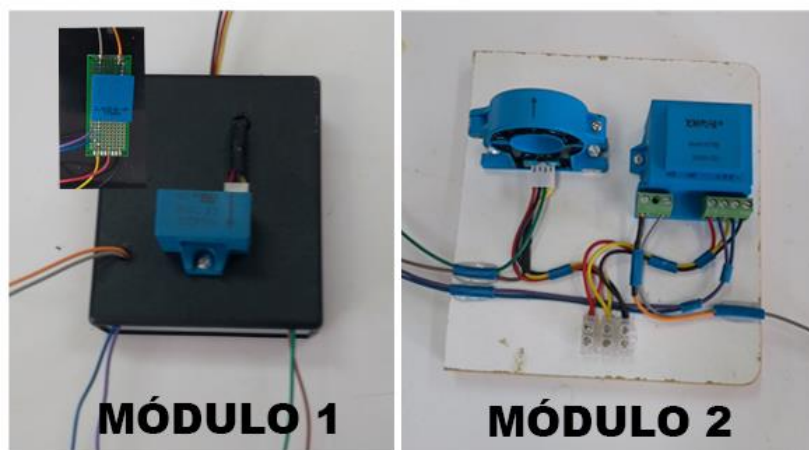
Cada conjunto contém um transdutor de tensão e um de corrente, os dados adquiridos seguem um fluxo segundo croqui mostrado pela Figura 57. A Figura 68 mostra cada um módulos de aquisição de dados, onde no módulo 1 tem-se os sensores da marca LEM, e no módulo 2 sensores da marca YHDC.

Figura 57 - Croqui sistema de aquisição e monitoramento de dados.



Fonte: (Dados da pesquisa)

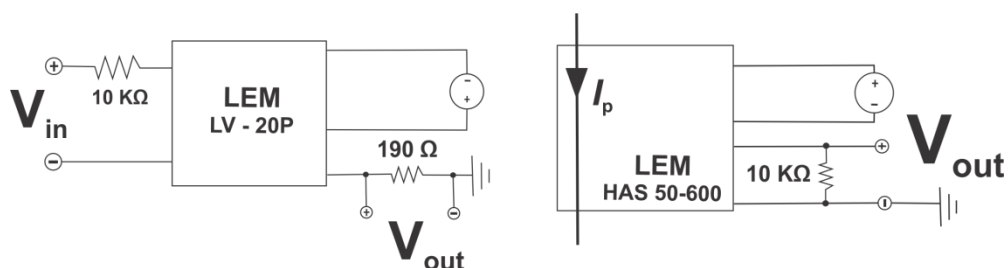
Figura 58 - Módulos de aquisição de dados.



Fonte: (Dados da pesquisa).

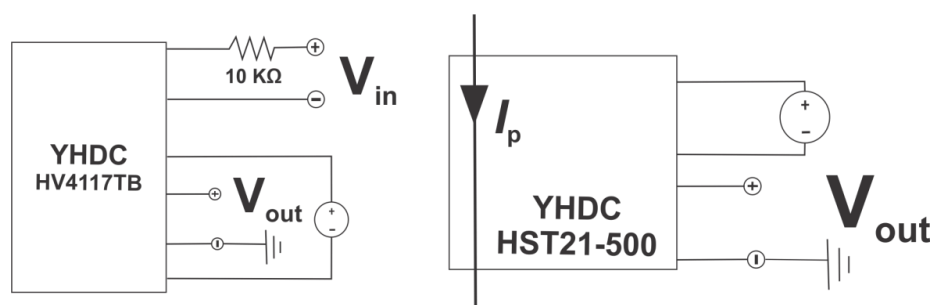
Os sinais captados das fontes de soldagem passam primeiramente por um sistema condicionador montado conforme orientações dos fabricantes dos sensores, o esquema elétrico montado para o condicionamento dos sinais pode ser visto nas Figuras 59 e 60, em seguida passam pelo sistema do sensor que condiciona os sinais segundo a necessidade e limitação do dispositivo de aquisição, em seguida passam pelo dispositivo *DAQ* que transforma os sinais analógicos em digitais, após esta transformação os dados são enviados a um computador que contém um programa capaz de exibir ao usuário, gráficos dos sinais (oscilogramas), valores médios e realizar o armazenamento dos dados adquiridos para futuras análises.

Figura 59 - Sistema elétrico do módulo 1.



Fonte: (Dados da pesquisa)

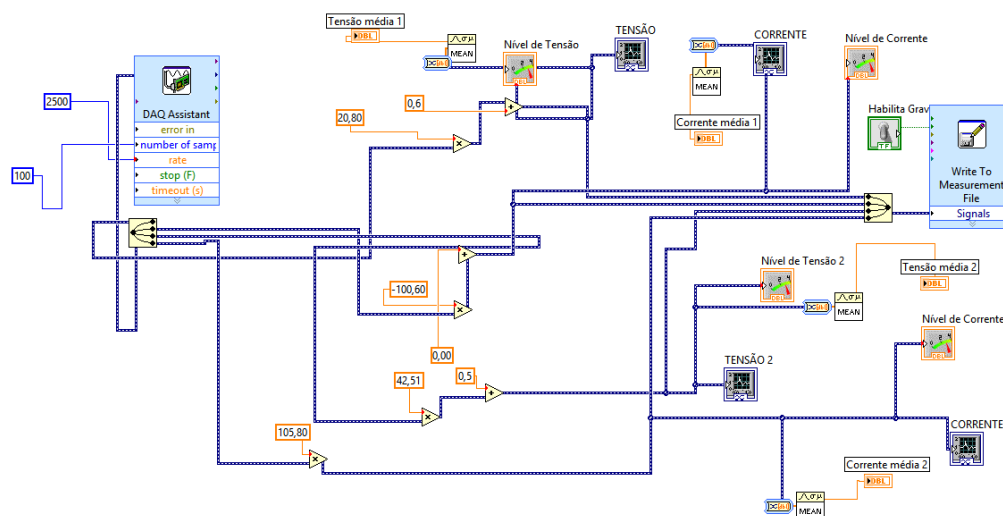
Figura 60 - Sistema elétrico do módulo 2.



Fonte: (Dados da pesquisa)

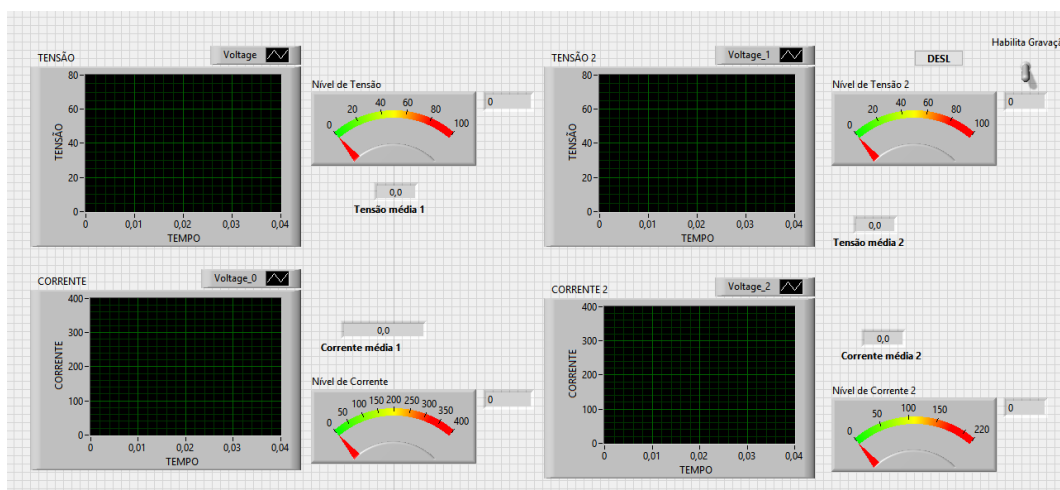
Na programação foram utilizados os seguintes módulos: *DAQ Assistant*: módulo que liga o software aos sinais adquiridos pela placa; Módulos numéricos: que realizam a multiplicação dos sinais captados pela placa, na mesma proporção em que estes foram condicionados; Módulos estatísticos: que realizam operações com os sinais captados, resultando na média dos sinais; Write To Measurement File: módulo que lê e salva os dados coletados em uma planilha de Excel; Módulos indicadores: indicadores gráficos dos sinais obtidos. Nas Figuras 61 e 62 a seguir observa-se a programação utilizada e o painel frontal da programação.

Figura 61 - Diagrama de blocos da programação.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 62 - Painel Frontal da Programação.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Os valores utilizados nos módulos numéricos da programação foram obtidos por meio de calibração, sendo realizada por meio de verificação através do indicador digital da fonte de soldagem, para tanto foram colocadas diferentes intensidades de tensão e corrente no sistema, seus sinais captados diretamente dos sensores com um multímetro e a partir da leitura realizada no indicador digital da fonte de soldagem e no multímetro, realizou-se uma regra de três para encontrar o valor multiplicador dos dados para que os mesmos correspondessem ao valor real da grandeza. Os valores utilizados como multiplicadores nos módulos estão descritos na Tabela 23, neles já contendo a parcela de erros sistemáticos do sistema descoberto através de análise de incertezas do sistema, que será descrita a seguir. A taxa de amostragem utilizada foi de 2500 S/s com resolução de 12 bits, segundo Machado

(2011) para se observar sinais de soldagem com fins tecnológicos uma taxa de amostragem de 1280 S/s é suficiente.

Tabela 23 - Valores numéricos multiplicadores dos módulos.

<b>Sinal</b>	<b>Multiplicador</b>
Tensão módulo 1	20,8 / + 0,6
Corrente módulo 1	100,6
Tensão módulo 2	42,51 / +0,5
Corrente módulo 2	105,8

Fonte: (Dados da pesquisa)

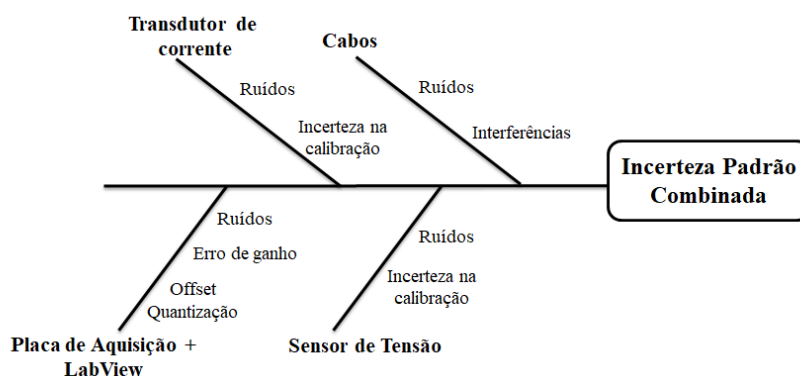
A fim de confirmar que os valores medidos realmente demonstravam os valores reais foi realizada uma análise de incerteza do sistema de medição de dados com o objetivo de definir os fatores que poderiam gerar incertezas nas medições e quantificar o valor que estas incertezas podem gerar, a fim de que estes erros não influenciem no resultado final das medições. O tópico a seguir explicita esta análise de incerteza.

### **Análise de incertezas do sistema de aquisição de dados**

Albertazzi Jr. e Sousa (2008) definem a incerteza como um parâmetro, que diferencia a faixa dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando, de acordo com as limitações metrológicas específicas de cada módulo do sistema. Para este estudo foi realizada uma análise de incertezas do tipo B, através de procedimentos não estatísticos, através do método de propagação de incerteza através de módulos descrita por Albertazzi Jr. e Sousa (2008), pelo fato deste método se aplicar a sistemas compostos por diversos módulos que é o modelo do sistema em questão. Este método avalia a incerteza através de um modelo matemático que identifica o comportamento individual de cada módulo por meio de suas interligações.

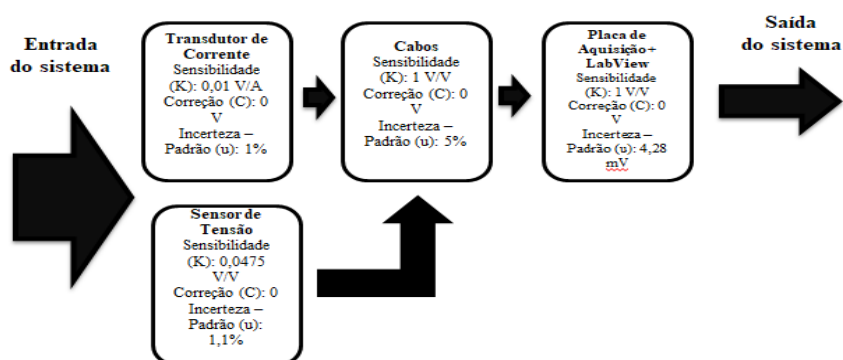
O primeiro passo da análise foi realizar um levantamento das incertezas individuais de cada bloco de cada módulo do sistema. A Figura 63 ilustra um diagrama espinha de peixe com as principais fontes de incertezas identificadas. A partir deste ponto foram classificados individualmente os parâmetros metrológicos significantes de cada um dos blocos de cada um dos módulos, esta classificação pode ser vista nas Figuras 64 e 65.

Figura 63 - Diagrama de causas e efeitos com incertezas das medições consideradas nos cálculos.



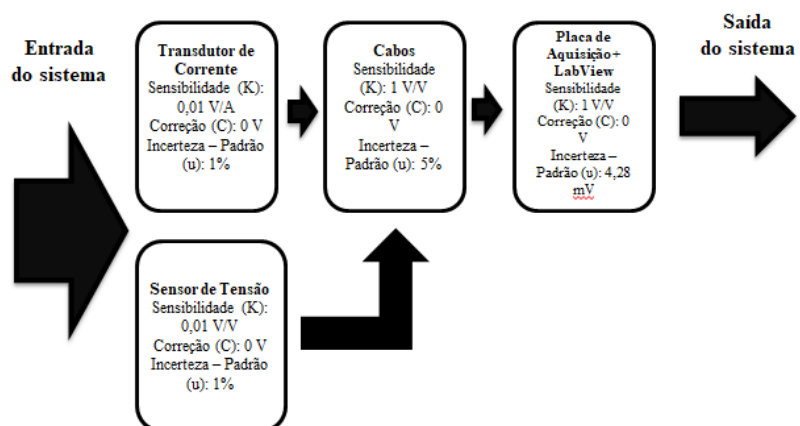
Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 64 - Módulos e parâmetros individuais a serem utilizados nos cálculos do módulo 1.



Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 65 - Módulos e parâmetros individuais a serem utilizados nos cálculos do módulo 2.



.Fonte: (Dados da pesquisa)

Os critérios utilizados na classificação das incertezas seguem na Tabela 24, outros fatores como temperatura e umidade do ar foram desconsiderados pelo fato de não influenciarem o processo de medição em questão uma vez que a temperatura ambiente no momento de medição era de 25° Celsius, faixa recomendada pelos fabricantes dos aparelhos utilizados.

Tabela 24 - Classificação dos blocos segundo fontes de incertezas.

<b>Blocos</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Correção</b>	<b>Incerteza-padrão</b>	<b>Observações</b>
Sensor de tensão LEM	0,0475 V/V	0 V	1,1 %	Dados do fabricante
Transdutor de corrente LEM	0,01 V/A	0 V	1 %	Dados do fabricante
Sensor de tensão YHDC	0,01 V/V	0 V	1 %	Dados do fabricante
Transdutor de corrente YHDC	0,01 V/A	0 V	1 %	Dados do fabricante
Cabos	1 V/V	0 V	5 %	Segundo especificações sugeridas por Lax (2012) <i>apud</i> Guimarães (2013)
Placa simétrica + LabView	1 V/V	0 V	4,28 mV	Dados do fabricante

Fonte: (Dados da pesquisa)

Em posse de todas as informações seguiu-se o roteiro indicado por Albertazzi Jr. e Sousa (2008) para a realização dos cálculos e a construção das tabelas seguintes. Com relação aos transdutores de corrente suas classificações demonstraram os mesmos dados, assim os resultados relacionados a suas incertezas então descritos na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados de medição e incerteza do sistema relacionados aos dados de corrente.

	Transdutor de Corrente		Cabos		DAQ + Software	
Sensibilidade ( K )	0,01	V/A	1	V/V	1	V/V
Correção ( C )	0	V	0	V	0	V
Íncerteza ( u )	1	%	5	% (±)	0,00428	V
<b>Saída do SM</b>						
	0,5787	V	(aprox. 57,87 A)			
<b>Dados do sistema</b>			<b>Saída dos blocos</b>			
K (SM)	0,01	V	S (TC)	0,5787	V	
E (SM)	57,87	A	S (C)	0,5787	V	
			S (DAQ)	0,5787	V	
<b>Correções Relativas (Cr)</b>			<b>Correção Relativa Combinada</b>			
Cr (TC)	0		Cr (SM)	0		
Cr (C)	0		C (E)	0		
Cr (DAQ)	0					
<b>Íncertezas-padrão Relativas (ur)</b>						
Fonte	Ur		Distribuição	Divisor	Contribuição	v
Cr (TC)	0,01	V	Normal	2	0,005	∞
Cr (C)	0,05	V	Retangular	1,73	0,028901734	∞
Cr (DAQ)	0,00428	V	Retangular	1,73	0,002473988	∞
<b>Íncertezas-padrão Rel.Comb. do SM (ur)</b>			<b>Íncerteza expandida</b>			
ur (SM)	0,029435198	V	v	∞		
ur (E)	1,70341488	A	U (E)	3,406829761 A		
<b>Resultado da medição</b>						
<b>RM = (I + C ± U95%) A</b>						
<b>RM = (57,87 + 0 ± 3,41) A</b>						

Fonte: Dados da pesquisa)

Com relação aos resultados dos sensores de tensão, pode-se observar os resultados dos módulos 1 e 2 nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26 - Resultados de medição e incerteza do sistema relacionados aos dados de tensão do módulo 1.

	Sensor de Tensão		Cabos		DAQ + Software	
Sensibilidade ( K )	0,0475	V/V	1	V/V	1	V/V
Correção ( C )	0	V	0	V	0	V
Incerteza ( u )	1.1	% (±)	5	% (±)	0,00428	V
<b>Saída do SM</b>	0,79135	V	(aprox. 16,66 V)			
<b>Dados do sistema</b>			<b>Saída dos blocos</b>			
K (SM)	0,0475	V	S (T)	0,0475	V	
E (SM)	16,66	V	S (C)	0,0475	V	
			S (DAQ)	0,0475	V	
<b>Correções Relativas (Cr)</b>		<b>Correção Relativa Combinada</b>				
Cr (T)	0	Cr (SM)	0			
Cr (C)	0	C (E)	0			
Cr (DAQ)	0					
<b>Incertezas-padrão Relativas (ur)</b>						
Fonte	Ur		Distribuição	Divisor	Contribuição	v
Cr (T)	0,011	V	Normal	2	0,0055	∞
Cr (C)	0,05	V	Retangular	1,73	0,028901734	∞
Cr (DAQ)	0,00428	V	Retangular	1,73	0,002473988	∞
<b>Incertezas-padrão Rel. Comb. do SM (ur)</b>			<b>Incerteza expandida</b>			
ur (SM)	0,029524242	V	v	∞		
ur (E)	0,491873868	V	U (E)	0,983747736	V	
<b>Resultado da medição</b>						
<b>RM = ( I + C ± U95% ) V</b>						
<b>RM = ( 16,66+ 0 ± 0,98 ) V</b>						

Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 27 - Resultados de medição e incerteza do sistema relacionados aos dados de tensão do módulo 2.

	Sensor de Tensão		Cabos		DAQ + Software	
Sensibilidade ( K )	0,01	V/V	1	V/V	1	V/V
Correção ( C )	0	V	0	V	0	V
Incerteza ( u )	1	% (±)	5	% (±)	0,00428	V
<b>Saída do SM</b>	0,1666	V	(aprox. 16,66 V)			
<b>Dados do sistema</b>			<b>Saída dos blocos</b>			
K (SM)	0,01	V	S (T)	0,01	V	
E (SM)	16,66	V	S (C)	0,01	V	
			S (DAQ)	0,01	V	
<b>Correções Relativas (Cr)</b>		<b>Correção Relativa Combinada</b>				
Cr (T)	0	Cr (SM)	0			
Cr (C)	0	C (E)	0			
Cr (DAQ)	0					
<b>Incertezas-padrão Relativas (ur)</b>						
Fonte	Ur		Distribuição	Divisor	Contribuição	v
Cr (T)	0,01	V	Normal	2	0,005	∞
Cr (C)	0,05	V	Retangular	1,73	0,028901734	∞
Cr (DAQ)	0,00428	V	Retangular	1,73	0,002473988	∞
<b>Incertezas-padrão Rel. Comb. do SM (ur)</b>			<b>Incerteza expandida</b>			
ur (SM)	0,029435198	V	v	∞		
ur (E)	0,490390391	V	U (E)	0,980780781	V	
<b>Resultado da medição</b>						
<b>RM = ( I + C ± U95% ) V</b>						
<b>RM = ( 16,66+ 0 ± 0,98 ) V</b>						

Fonte: Dados da pesquisa)

Por fim, pode-se afirmar que a faixa que compreende os valores de corrente e tensão do sistema de medição experimentado é, respectivamente, de  $(57,87 \pm 3,41)$  A e  $(16,66 \pm 0,98)$  V. Através dos resultados podemos observar que a parcela de incerteza global do sistema calculada corresponde a aproximadamente 5,8 % dos resultados e este valor está associado a erros aleatórios do sistema, erros imprevisíveis.

## APÊNDICE II – Oscilogramas e Tabelas Referentes ao Capítulo 5

### Processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta

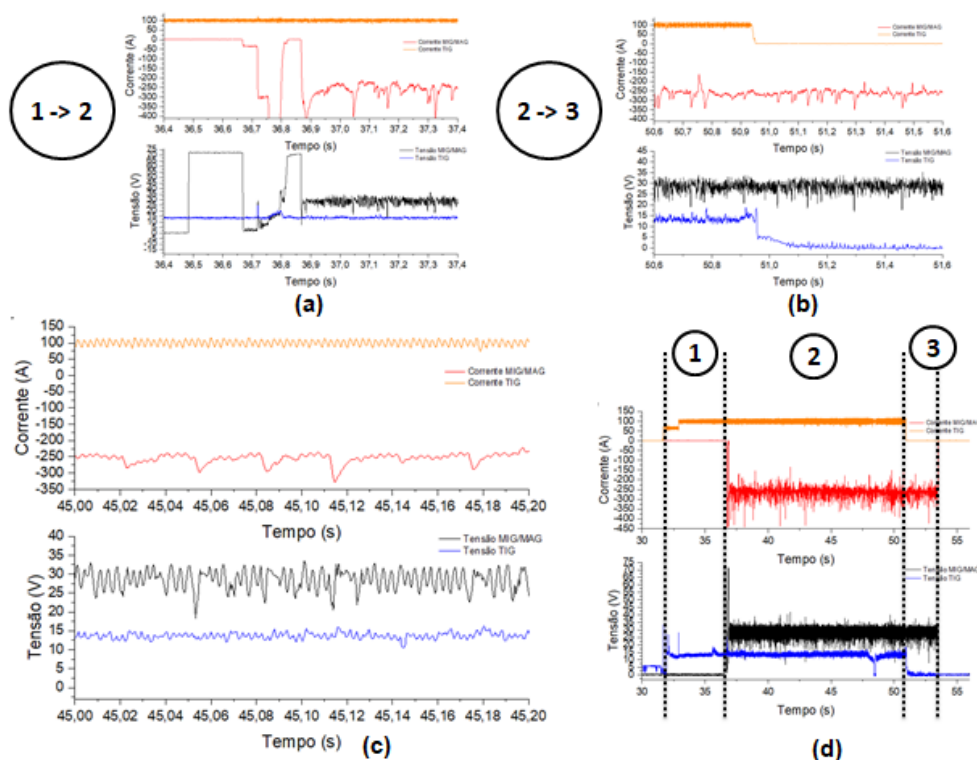
As Tabelas 28, 29 e 30 são referentes aos valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média dos experimentos. E as Figuras 66, 67 e 68 os oscilogramas de soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e  $I_{TIG}$  a 100, 150 e 200 A, respectivamente.

Tabela 28 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com  $I_{TIG}$  a 100 A.

<b>TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com <math>I_{TIG}</math> a 100 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	0,16	0,28	28,46	28,58	28,47	28,59
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,40	0,51	- 261,40	262,04	-263,00	263,69
<b>Tensão TIG (V)</b>	13,03	13,04	13,78	13,81	0,21	0,77
<b>Corrente TIG (A)</b>	100,13	100,29	100,08	100,51	0,36	0,51
<b>Potência Instantânea Média (W)</b>	MIG/MAG 0,06	TIG 1305,91	MIG/MAG -7444,37	TIG 1383,87	MIG/MAG -7492,06	TIG 0,10

Fonte: (Dados da pesquisa).

Figura 66 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e  $I_{TIG}$  a 100 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.



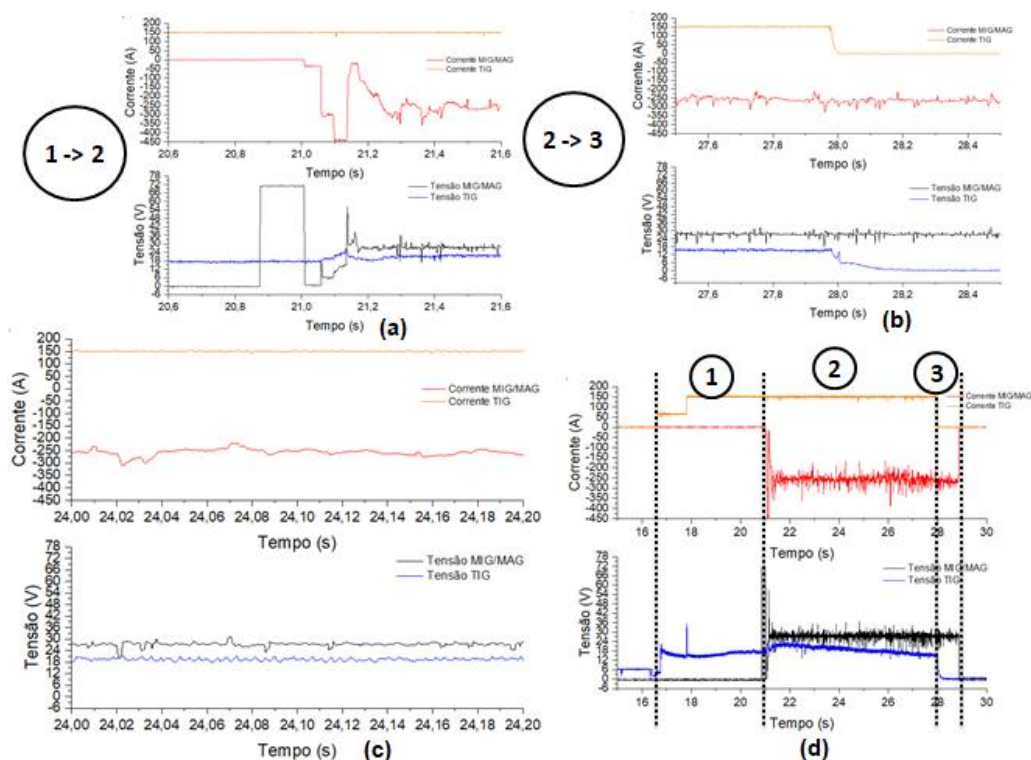
Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 29 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com  $I_{TIG}$  a 150 A.

<b>TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com <math>I_{TIG}</math> a 150 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	-0,40	0,44	27,27	27,3	27,26	27,28
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,25	0,34	-255,80	256,31	-267,13	267,36
<b>Tensão TIG (V)</b>	15,66	15,69	18,33	18,35	0,88	2,05
<b>Corrente TIG (A)</b>	150,23	150,24	150,14	150,16	0,02	0,38
<b>Potência Instantânea Média (W)</b>	MIG/MAG	TIG	MIG/MAG	TIG	MIG/MAG	TIG
	-0,10	2352,28	-6975,39	2752,79	-7282,49	0,06

Fonte: (Dados da pesquisa).

Figura 67 – Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e  $I_{TIG}$  a 150 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.



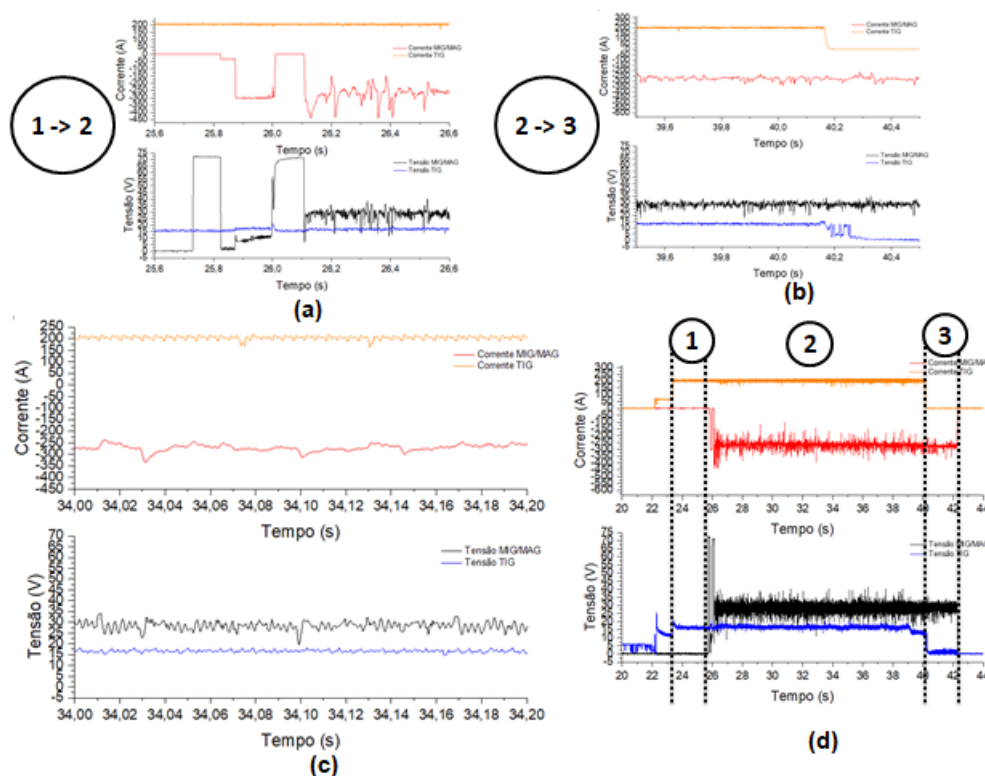
Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 30 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com  $I_{TIG}$  a 200 A.

<b>TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta com <math>I_{TIG}</math> a 200 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	0,17	0,29	28,50	28,57	28,58	28,63
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,38	0,47	- 268,43	269,03	- 277,53	277,91
<b>Tensão TIG (V)</b>	16,19	16,20	16,48	16,51	1,26	1,93
<b>Corrente TIG (A)</b>	205,01	205,05	204,60	204,73	0,40	0,57
<b>Potência Instantânea</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>
<b>Média (W)</b>	0,06	3318,51	- 7651,73	3374,24	- 7934,89	0,66

Fonte: (Dados da pesquisa)

Figura 68 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade direta e  $I_{TIG}$  a 200 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.



Fonte: (Dados da pesquisa)

### Processo TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional

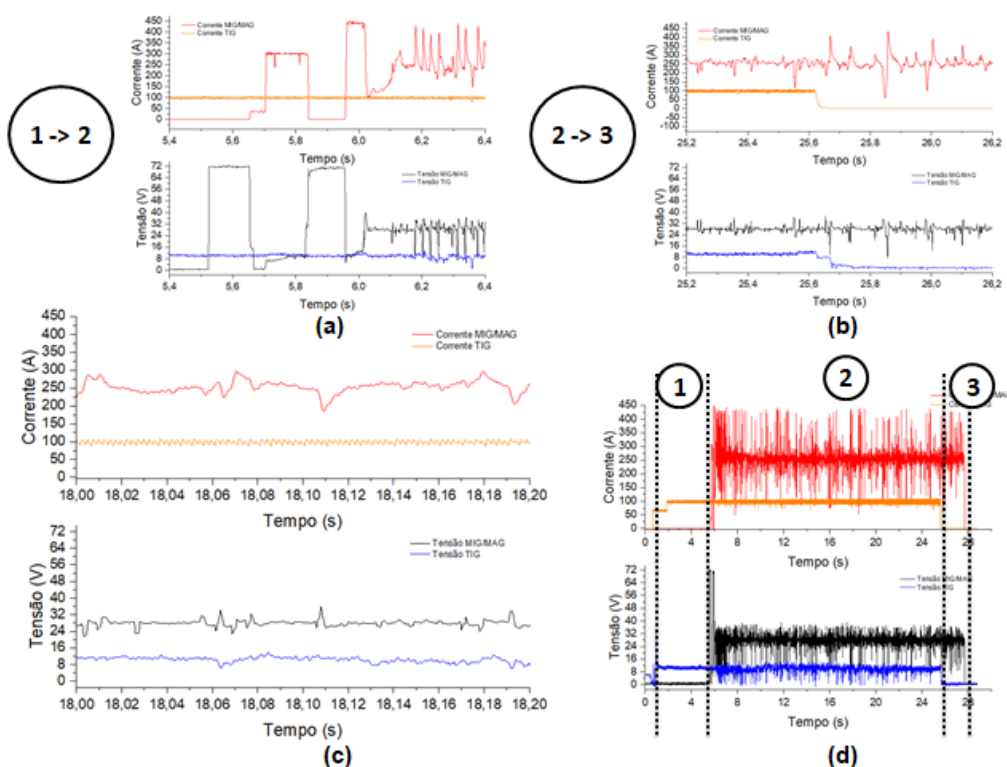
As Tabelas 31, 32 e 33 são referentes aos valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média dos experimentos. E as Figuras 69, 70 e 71 os oscilogramas de soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e  $I_{TIG}$  a 100, 150 e 200 A, respectivamente.

Tabela 31 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com  $I_{TIG}$  a 100 A.

<b>TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e <math>I_{TIG}</math> a 100 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	0,58	0,76	27,94	28,16	27,93	28,17
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,49	0,77	253,71	256,25	256,50	258,66
<b>Tensão TIG (V)</b>	10,57	10,67	9,75	9,97	0,48	0,78
<b>Corrente TIG (A)</b>	98,58	100,89	98,44	100,36	0,51	0,92
<b>Potência Instantânea Média (W)</b>	MIG/MAG	TIG	MIG/MAG	TIG	MIG/MAG	TIG
	0,28	1061,82	7082,97	976	7160,83	0,24

Fonte: (Dados da pesquisa).

Figura 69 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e  $I_{TIG}$  a 100 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.



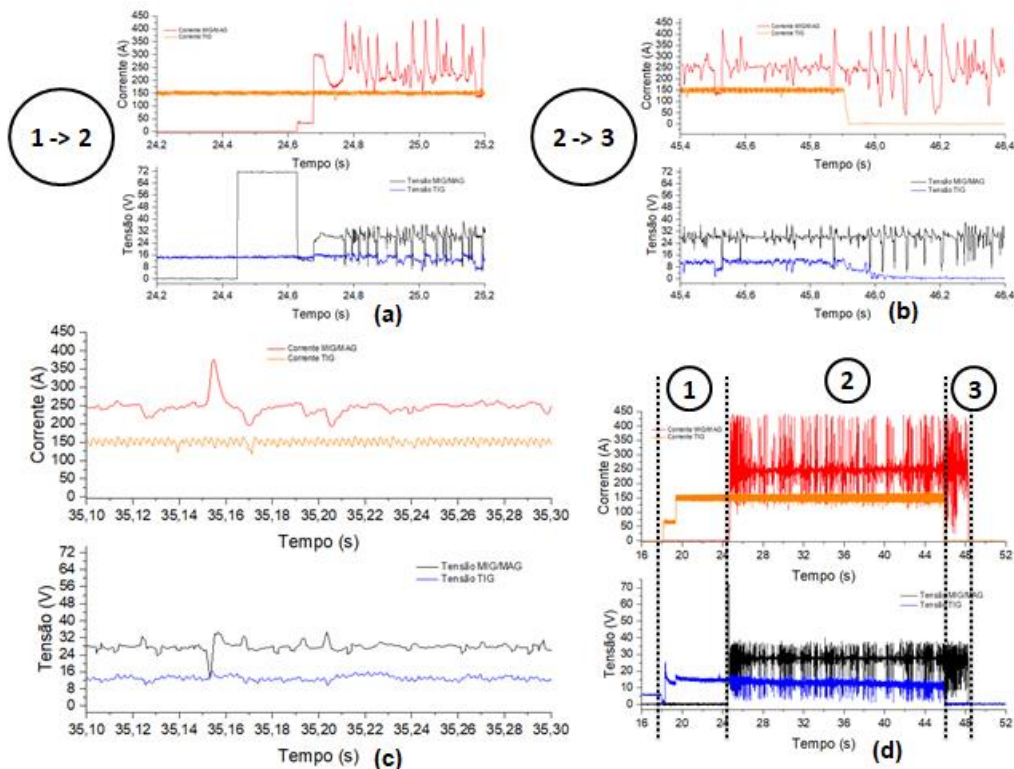
Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 32 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com  $I_{TIG}$  a 150 A.

<b>TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e <math>I_{TIG}</math> a 150 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	0,18	0,49	27,74	27,96	27,69	28,27
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,31	0,63	245,62	249,14	242,91	250,81
<b>Tensão TIG (V)</b>	14,92	15,01	12,53	12,79	0,43	0,77
<b>Corrente TIG (A)</b>	150,71	152,75	150,60	152,30	0,50	0,91
<b>Potência Instantânea Média (W)</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>
	0,06	2279,4	6809,76	1911,41	6702,71	0,21

Fonte: (Dados da pesquisa).

Figura 70 – Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e  $I_{TIG}$  a 150 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.



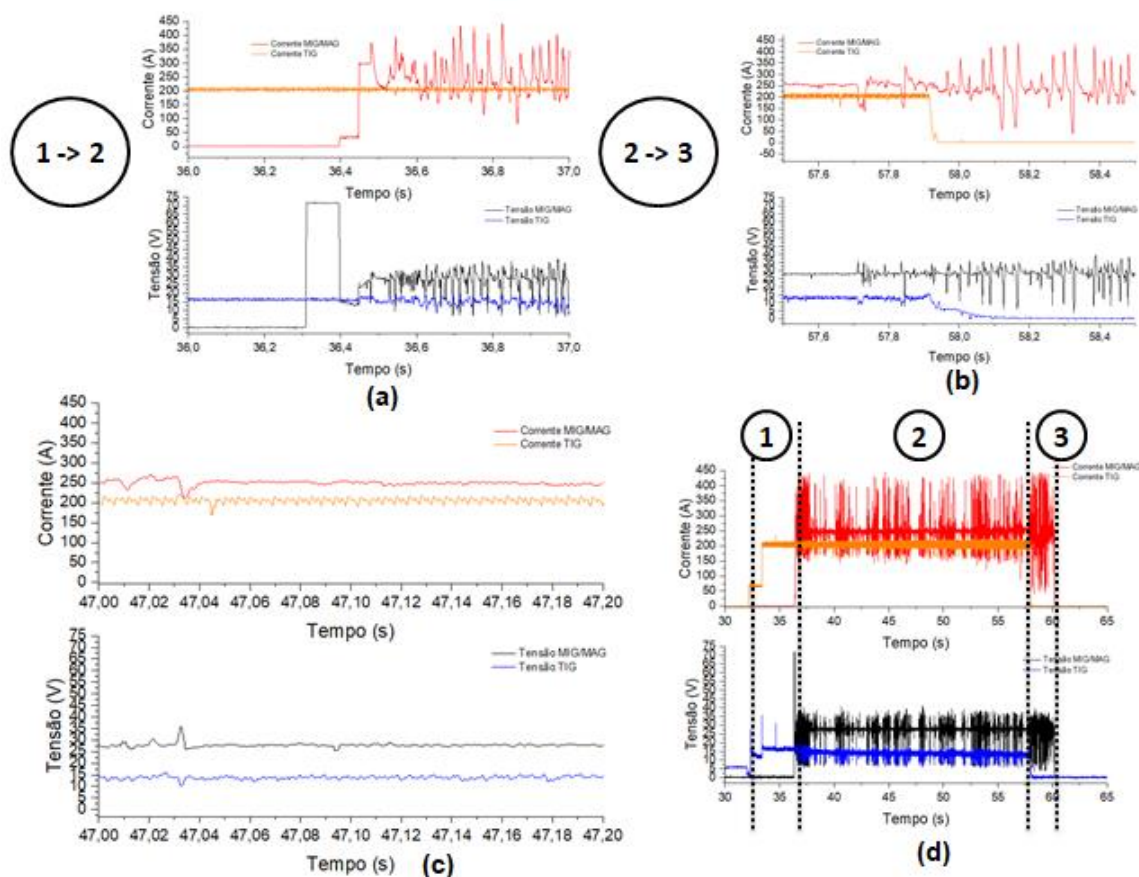
Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 33 - Valores médios e eficazes de tensão e corrente e potência instantânea média de soldagem com TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional com  $I_{TIG}$  a 200 A.

<b>TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e <math>I_{TIG}</math> a 200 A</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>	<b>Média</b>	<b>RMS</b>
<b>Tensão MIG/MAG (V)</b>	0,35	0,56	27,78	27,94	27,69	28,37
<b>Corrente MIG/MAG (A)</b>	0,48	0,70	247,06	248,80	241,48	250,62
<b>Tensão TIG (V)</b>	16,30	16,41	13,60	13,76	0,45	0,88
<b>Corrente TIG (A)</b>	205,83	207,47	205,51	206,93	0,55	1,02
<b>Potência Instantânea Média (W)</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>	<b>MIG/MAG</b>	<b>TIG</b>
	0,17	3390,95	6862,21	2822,33	6658,85	0,27

Fonte: (Dados da pesquisa).

Figura 71 - Oscilogramas de corrente e tensão para soldagem TIG-MIG/MAG com o eletrodo MIG/MAG na polaridade convencional e  $I_{TIG}$  a 200 A. (a) início de operação do processo MIG/MAG; (b) fim de operação do processo TIG; (c) comportamento dos sinais em 200 ms (d) comportamento dos sinais em todo processo.



Fonte: (Dados da pesquisa)

## APÊNDICE III – Medidas Referentes aos cálculos do Capítulo 6

A Tabela 34 apresenta os valores utilizados para o cálculo das taxas apresentadas no Capítulo 6.

Tabela 34 - Valores referentes aos cálculos do Capítulo 6.

<b>Polaridade</b>	<b>I<sub>TIG</sub></b>	<b>Exp.</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final (g)</b>	<b>Tempo de arco MIG/MAG aberto (min)</b>
<b>Polaridade Convencional</b>	0	2	512,82	541,41	0,473167
	50	7	512,07	536,84	0,396333
	100	1	509,64	532,8	0,369667
	150	4	512,82	538,63	0,397167
	200	5	506,14	532,07	0,398
<b>Polaridade Direta</b>	0	11	475,3	499,53	0,2795
	50	12	469,68	490,14	0,262
	100	10	518,65	541,63	0,283667
	150	14	470,67	492,73	0,267833
	200	9	518,68	536,01	0,276167

Fonte: (Dados da pesquisa)

## APÊNDICE IV – Medidas Geométricas Referentes aos ensaios do Capítulo 7

As tabelas 35 e 36 apresentam, respectivamente, os resultados das medições 1 e 2 utilizadas para o cálculo dos valores médios dos parâmetros geométricos apresentados no Capítulos 7.

Tabela 35 - Medida 1 dos aspectos geométricos do Capítulo 7.

	Polaridade	I <sub>TIG</sub>	Exp.	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área fundida (mm <sup>2</sup> )	Ângulo (°)
<b>Medida 1</b>	<b>Polaridade Convencional</b>	0	2	2,78	2,60	13,18	21,50	41,16
		50	7	2,71	2,58	11,30	14,80	53,40
		100	1	2,71	2,97	12,52	20,80	33,84
		150	4	3,39	3,32	11,79	20,10	45,51
		200	5	3,09	3,69	12,22	21,30	41,98
	<b>Polaridade Direta</b>	0	11	3,11	1,33	7,11	5,80	77,54
		50	12	2,67	1,22	8,06	4,60	68,38
		100	10	2,56	1,28	8,12	5,10	54,91
		150	14	2,84	1,42	8,85	10,20	57,32
		200	9	2,90	1,81	9,29	9,50	49,43

Fonte: (Dados da pesquisa)

Tabela 36 - Medida 2 dos aspectos geométricos do Capítulo 7.

	Polaridade	I <sub>TIG</sub>	Exp.	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área fundida (mm <sup>2</sup> )	Ângulo (°)
<b>Medida 2</b>	<b>Polaridade Convencional</b>	0	2	2,56	2,52	11,93	16,28	45,74
		50	7	2,82	2,94	11,93	16,80	48,06
		100	1	3,03	3,03	11,93	20,15	46,89
		150	4	3,08	3,08	11,12	18,02	43,98
		200	5	3,17	3,19	11,91	21,14	42,25
	<b>Polaridade Direta</b>	0	11	3,45	1,28	7,91	5,14	68,35
		50	12	3,02	1,45	9,31	7,50	54,65
		100	10	3,19	1,28	8,59	6,40	63,30
		150	14	2,64	1,56	9,18	9,99	57,64
		200	9	3,22	2,21	9,36	12,06	59,95

Fonte: (Dados da pesquisa)