

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A GEOMETRIA DO  
CORDÃO DE SOLDA DEPOSITADO PELO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG – MAG EM  
TANDEM

por

Gustavo Simões Teixeira

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2011.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A GEOMETRIA DO  
CORDÃO DE SOLDA DEPOSITADO PELO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG – MAG EM  
TANDEM

por

Gustavo Simões Teixeira  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da  
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Aprovada por:

Prof. Dr. Carlos René Gómez Pérez (CIS – UCLV / Santa Clara – Cuba)

Prof. Dr. Flávio José Lorini (PROMEC – UFRGS / Porto Alegre – Brasil)

Prof. Dr. Ivan Guerra Machado (PPG3M – UFRGS / Porto Alegre – Brasil)

Prof. Ph.D. Francis Henrique Ramos França  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 25 de Março de 2011.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que de alguma forma me deram forças e apoio para vencer esta importante etapa da minha vida. São inúmeras pessoas e tentarei incluir todos nesse pequeno espaço.

Inicialmente, gostaria de agradecer a minha família, presente em todos os momentos, em especial na hora que resolvi largar a vida na indústria e voltar aos estudos para ingressar na vida acadêmica. Este trabalho é a minha forma de expressar o orgulho, amor e gratidão que sinto por eles.

Agradeço ao meu orientador, Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro, pelo apoio em todos os momentos do trabalho, principalmente nas dificuldades. Além de orientador, foi o primeiro grande amigo que fiz na UFRGS nesses dois anos de trabalho. Agradeço também ao Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez, não somente pela ajuda no planejamento experimental e como professor de processos de soldagem, mas pelos conselhos e atenção dados nos momentos de dúvidas, como no meu começo na carreira docente no IFRS. Por motivos meramente burocráticos, não pôde ser incluído como co-orientador, mas fica aqui o meu agradecimento especial pela ajuda indispensável e amizade demonstrada. Queria agradecer também ao CNPq, pelo apoio financeiro durante o mestrado.

Gostaria de agradecer ao pessoal do LS&TC, que me ensinaram como funciona na prática a ciência da soldagem. Liderados pelo Prof. Ivan Guerra Machado, a equipe composta pelo técnico Luiz Henrique Zaniratti, os futuros doutores Richard Lermen e Roger Verástegui, e os futuros engenheiros Diego Aires e Samyr Ismail, além de excelentes profissionais são amigos para todas as horas.

Agradeço a ajuda dos engenheiros Martin Geier e Marcelo de Mello na usinagem dos suportes de tochas para a bancada de soldagem, ao Prof. Paulo Henrique Cardoso e ao técnico Rodrigo Macedo por gentilmente ceder o Laboratório de Metalografia da FURG para realizar a análise metalográfica das amostras, ao Prof. Inácio Limberger pelo auxílio no começo do mestrado, e ao Prof. Mario Wolfart Júnior, por toda ajuda e amizade prestada.

Por fim, não posso me esquecer do pessoal do GMAp, da turma do futebol de quarta-feira na Hebraica, composta por alunos de graduação, mestrado e doutorado da engenharia da UFRGS. Toda conversa jogada fora, o futebol e as festas foram imprescindíveis para relaxar, amadurecer as ideias e ter forças para seguir em frente.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar a influência dos parâmetros de um sistema mecanizado de soldagem, composto por uma tocha TIG e outra MAG em tandem, sobre a geometria do cordão de solda resultante. Os resultados obtidos foram comparados com soldas realizadas pelos processos TIG e MAG operando isoladamente. Os testes foram executados por meio de simples deposição de cordões sobre chapas de aço ao carbono AISI 1010 com espessura de 6,3 mm. Os parâmetros analisados foram: corrente de soldagem e distância da ponta do eletrodo até a peça no processo TIG, velocidade de alimentação de arame e tensão do arco no processo MAG, além de velocidade de soldagem e distância entre as tochas. Os cordões de solda foram executados em um dispositivo de soldagem mecanizado, que permite a variação da velocidade de soldagem, distância da ponta do eletrodo TIG e a distância entre as tochas. Os ajustes de corrente e tensão de soldagem foram feitos em duas fontes de potência separadas, ambas do tipo transformador-retificador, uma para cada tocha, devido às diferentes curvas características de cada processo. Através do projeto de experimento fatorial fracionado, foram avaliados os efeitos de dois níveis, um mínimo e outro máximo, mais quatro réplicas dos seus níveis intermediários, resultando em 20 experimentos para cada processo de soldagem. Os valores dos resultados finais indicam uma diferença ao utilizar uma tocha TIG para pré-aquecer o material base, porém, estatisticamente, essa diferença não é significativa entre os processos TIG e MAG em tandem e MAG convencional para a faixa de parâmetros de soldagem adotada.

Palavras-chave: Processo MAG; Processo TIG; Soldagem TIG – MAG em Tandem; Geometria do Cordão de Solda; Projeto de Experimentos.

## **ABSTRACT**

This study aims to investigate the influence of process parameters of a mechanized welding system, comprising a GTAW torch and a GMAW torch in tandem configuration, on the geometry of the resulting weld bead, performed using GTAW and GMAW welding processes in tandem. The results were compared with weld beads performed by conventional GTAW and GMAW welding processes. The tests were conducted performing bead-on-plate deposits over AISI 1010 6,3 mm thick carbon steel plates. GTAW current, GMAW wire feed speed, GTAW arc length, GMAW voltage, welding speed and the distance between GTAW and GMAW torches were the analyzed parameters. The weld beads were performed in a mechanized welding bench, which allows the variation of speed, distance between torches and arc length of the GTAW torch. Current and voltage adjustments were made in two separate transformer-rectifier power sources, one for each welding torch, due to their different characteristic curves of each process. Through the fractional factorial design of experiment, the effects of two different levels for each parameter were analyzed, plus four replicates of the average values of these levels, resulting in 20 experiments for each welding process. The results show a difference on the weld bead geometry using a GTAW torch to preheat the base metal, however, this difference is not statistically significant between GTAW and GMAW welding process in tandem and GMAW welding process for the adopted range of welding parameters.

**Keywords:** GMAW, GTAW, GTAW – GMAW Welding in Tandem, Weld Bead Geometry, Design of Experiment.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1	Processo de Soldagem TIG .....	4
3.1.1	Parâmetros de Soldagem TIG .....	6
3.2	Processo de Soldagem MIG/MAG .....	7
3.2.1	Parâmetros de Soldagem MIG/MAG .....	9
3.3	Processos de Soldagem Combinados .....	11
3.3.1	Processos de Soldagem Híbridos .....	12
3.3.1.1	Processo de Soldagem Híbrido Plasma-MIG .....	14
3.3.1.2	Processo de Soldagem Híbrido LASER-TIG .....	17
3.3.1.3	Processo de Soldagem Híbrido LASER-MIG .....	19
3.3.1.4	Processo de Soldagem Híbrido Plasma-LASER .....	21
3.3.1.5	Processo de Soldagem Híbrido TIG-MIG .....	21
3.3.2	Processos de Soldagem em Tandem .....	22
3.3.2.1	Processo de Soldagem por Arco Submerso em Tandem .....	23
3.3.2.2	Processo de Soldagem MIG/MAG em Tandem .....	23
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>26</b>
4.1	Material Utilizado .....	26
4.2	Preparação dos Corpos de Prova para a Soldagem .....	26
4.2.1	Corpos de Prova para Soldagem em Tandem .....	27
4.2.2	Corpos de Prova para Soldagem TIG e MAG .....	27
4.3	Equipamentos Utilizados .....	27
4.4	Consumíveis .....	30
4.5	Procedimento de Soldagem .....	31

4.5.1	Definição de Parâmetros de Soldagem para os Processos TIG e MAG	33
.....		
4.5.2	Definição de Parâmetros de Soldagem para os Processos TIG e MAG em Tandem	34
4.5.3	Preparação do Projeto de Experimentos	35
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>38</b>
5.1	Soldagem TIG	38
5.1.1	Análise da Área do Cordão de Solda para o Processo TIG	40
5.1.2	Análise da Penetração do Cordão de Solda para o Processo TIG	41
5.1.3	Análise da Largura do Cordão de Solda para o Processo TIG	43
5.2	Soldagem MAG	44
5.2.1	Análise da Área do Cordão de Solda para o Processo MAG	45
5.2.2	Análise da Penetração do Cordão de Solda para o Processo MAG	48
5.2.3	Análise da Largura do Cordão de Solda para o Processo MAG	51
5.2.4	Análise do Reforço do Cordão de Solda para o Processo MAG	52
5.3	Soldagem TIG e MAG em Tandem	54
5.3.1	Análise da Área do Cordão de Solda para o Processo TIG e MAG em Tandem	57
5.3.2	Análise da Penetração do Cordão de Solda para o Processo TIG e MAG em Tandem	58
5.3.3	Análise da Largura do Cordão de Solda para o Processo TIG e MAG em Tandem	61
5.3.4	Análise do Reforço do Cordão de Solda para o Processo TIG e MAG em Tandem	63
5.4	Comparação entre os Processos de Soldagem	64
5.4.1	Comparação entre os Processos de Soldagem – Área do Cordão de Solda	64
5.4.2	Comparação entre os Processos de Soldagem – Penetração do Cordão de Solda	66
5.4.3	Comparação entre os Processos de Soldagem – Largura do Cordão de Solda	68

5.4.4	Comparação entre os Processos de Soldagem – Reforço do Cordão de Solda .....	70
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO I .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Equipamento para soldagem TIG .....	4
Figura 3.2	Equipamento para soldagem MIG/MAG .....	8
Figura 3.3	Desenho esquemático do conceito original das tochas de soldagem Plasma-MIG .....	16
Figura 3.4	Desenho esquemático de uma tocha de soldagem Plasma-MIG com eletrodo de cobre anular .....	17
Figura 3.5	Processo de soldagem híbrido LASER-TIG .....	18
Figura 3.6	Comparação entre as poças de fusão nos processos de soldagem por LASER e MIG/MAG .....	20
Figura 3.7	Combinação dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG em um único processo .....	22
Figura 3.8	Esquema de um sistema de soldagem MIG/MAG em tandem .....	24
Figura 4.1	Fontes de soldagem: (a) White Martins SOLTIG 350 AC/DC; (b) Migtronic BDH 550 .....	28
Figura 4.2	Bancada de soldagem mecanizada .....	29
Figura 4.3	Esquema dos equipamentos envolvidos na execução dos cordões de solda .....	32
Figura 4.4	Dimensões do cordão de solda .....	32
Figura 4.5	Parâmetros de controle, processo e parâmetros de saída .....	36
Figura 5.1	Gráfico da probabilidade normal para a área do cordão de solda do processo TIG .....	40
Figura 5.2	Diagrama de Pareto para a área do cordão de solda do processo TIG .....	41
Figura 5.3	Gráfico da probabilidade normal para a penetração do cordão de solda do processo TIG .....	42
Figura 5.4	Diagrama de Pareto para a penetração do cordão de solda do processo TIG .....	42
Figura 5.5	Gráfico da probabilidade normal para a largura do cordão de solda do processo TIG .....	43

Figura 5.6	Diagrama de Pareto para a largura do cordão de solda do processo TIG .....	44
Figura 5.7	Gráfico da probabilidade normal para a área do cordão de solda do processo MAG .....	46
Figura 5.8	Diagrama de Pareto para a área do cordão de solda do processo MAG .....	47
Figura 5.9	Interação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame na área do cordão de solda do processo MAG .....	47
Figura 5.10	Gráfico da probabilidade normal para a penetração do cordão de solda do processo MAG .....	48
Figura 5.11	Diagrama de Pareto para a penetração do cordão de solda do processo MAG .....	49
Figura 5.12	Interação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame na penetração do cordão de solda do processo MAG .....	50
Figura 5.13	Interação entre tensão e velocidade de soldagem na penetração do cordão de solda do processo MAG .....	50
Figura 5.14	Gráfico da probabilidade normal para a largura do cordão de solda do processo MAG .....	51
Figura 5.15	Diagrama de Pareto para a largura do cordão de solda do processo MAG .....	52
Figura 5.16	Gráfico da probabilidade normal para o reforço do cordão de solda do processo MAG .....	53
Figura 5.17	Diagrama de Pareto para o reforço do cordão de solda do processo MAG .....	53
Figura 5.18	Interação entre velocidade de alimentação de arame e tensão no reforço de cordão de solda do processo MAG .....	54
Figura 5.19	Gráfico da probabilidade normal para a área do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	57
Figura 5.20	Diagrama de Pareto para a área do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	58

Figura 5.21	Gráfico da probabilidade normal para a penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	59
Figura 5.22	Diagrama de Pareto para a penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	59
Figura 5.23	Interação entre velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem na penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	60
Figura 5.24	Interação entre tensão e velocidade de soldagem na penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	61
Figura 5.25	Gráfico da probabilidade normal para a largura do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	62
Figura 5.26	Diagrama de Pareto para a largura do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	62
Figura 5.27	Gráfico da probabilidade normal para a altura do reforço do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	63
Figura 5.28	Diagrama de Pareto para a altura do reforço do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem .....	64
Figura 5.29	Gráfico de valores individuais da área do cordão de solda para cada processo de soldagem .....	65
Figura 5.30	Gráfico tipo <i>box</i> com a área do cordão de solda para cada processo de soldagem .....	65
Figura 5.31	Gráfico de valores individuais da penetração do cordão de solda para cada processo de soldagem .....	67
Figura 5.32	Gráfico tipo <i>box</i> com a penetração do cordão de solda para cada processo de soldagem .....	67
Figura 5.33	Gráfico de valores individuais da largura do cordão de solda para cada processo de soldagem .....	69
Figura 5.34	Gráfico tipo <i>box</i> com a largura do cordão de solda para cada processo de soldagem .....	69
Figura 5.35	Gráfico de valores individuais da altura do reforço do cordão de solda para cada processo de soldagem .....	71

Figura 5.36	Gráfico tipo <i>box</i> com a altura do reforço do cordão de solda para cada processo de soldagem .....	71
Figura A.1	Cordão de solda do experimento 02 pelo processo TIG e MAG em tandem .....	84
Figura A.2	Macrografias do experimento 02 com as maiores médias de área e penetração do cordão de solda para o processo TIG e MAG em tandem .....	84
Figura A.3	Cordões de solda do experimento 02 pelos processos TIG convencional e MAG convencional .....	85
Figura A.4	Macrografias do experimento 02 com as maiores médias de área e penetração do cordão de solda para o processo TIG .....	85
Figura A.5	Macrografias do experimento 02 com a maior média de penetração do cordão de solda para o processo MAG .....	85
Figura A.6	Cordão de solda do experimento 04 pelo processo TIG e MAG em tandem .....	86
Figura A.7	Macrografias do cordão de solda do experimento 04 pelo processo TIG e MAG em tandem .....	86
Figura A.8	Cordões de solda do experimento 04 pelos processos TIG convencional e MAG convencional .....	87
Figura A.9	Macrografias do experimento 04 com a maior média de largura do cordão de solda para o processo TIG .....	87
Figura A.10	Macrografias do cordão de solda do experimento 04 pelo processo MAG .....	87
Figura A.11	Cordão de solda do experimento 07 pelo processo TIG e MAG em tandem .....	88
Figura A.12	Macrografias do experimento 07 com a maior média de largura do cordão de solda para o processo TIG e MAG em tandem .....	88
Figura A.13	Cordões de solda do experimento 07 pelos processos TIG convencional e MAG convencional .....	89
Figura A.14	Macrografias do cordão de solda do experimento 07 pelo processo TIG .....	89

Figura A.15	Macrografias do experimento 07 com a maior média de largura do cordão de solda para o processo MAG .....	89
Figura A.16	Cordão de solda do experimento 11 pelo processo TIG e MAG em tandem .....	90
Figura A.17	Macrografias do cordão de solda do experimento 11 pelo processo TIG e MAG em tandem .....	90
Figura A.18	Cordões de solda do experimento 11 pelos processos TIG convencional e MAG convencional .....	91
Figura A.19	Macrografias do cordão de solda do experimento 11 pelo processo TIG .....	91
Figura A.20	Macrografias do experimento 11 com a maior média de área do cordão de solda para o processo MAG .....	91
Figura A.21	Cordão de solda do experimento 16 pelo processo TIG e MAG em tandem .....	92
Figura A.22	Macrografias do experimento 16 com a maior média de altura de reforço do cordão de solda para o processo TIG e MAG em tandem .....	92
Figura A.23	Cordões de solda do experimento 16 pelos processos TIG convencional e MAG convencional .....	93
Figura A.24	Macrografias do cordão de solda do experimento 16 pelo processo TIG .....	93
Figura A.25	Macrografias do experimento 16 com a maior média de altura de reforço do cordão de solda para o processo MAG .....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Taxas de deposição possíveis com diferentes processos e técnicas de soldagem .....	23
Tabela 4.1	Composição química do aço ao carbono AISI 1010 (percentual em massa) .....	26
Tabela 4.2	Análise química do arame-eletrodo (percentual em massa) .....	30
Tabela 4.3	Ensaio mecânicos do arame-eletrodo .....	30
Tabela 4.4	Parâmetros de soldagem definitivos para o processo MAG .....	34
Tabela 4.5	Parâmetros de soldagem definitivos para o processo TIG .....	34
Tabela 4.6	Parâmetros de soldagem comuns aos processos TIG e MAG em tandem .....	35
Tabela 4.7	Parâmetros analisados, níveis mínimos e máximos, e pontos centrais .....	37
Tabela 5.1	Planejamento fatorial fracionado do experimento ( $2^{6-2} + 4$ ) e resultados obtidos para o processo de soldagem TIG .....	39
Tabela 5.2	Planejamento fatorial fracionado do experimento ( $2^{6-2} + 4$ ) e resultados obtidos para o processo de soldagem MAG .....	45
Tabela 5.3	Planejamento fatorial fracionado do experimento ( $2^{6-2} + 4$ ) para o processo de soldagem TIG e MAG em tandem .....	55
Tabela 5.4	Resultados do planejamento fatorial fracionado do experimento ( $2^{6-2} + 4$ ) para o processo de soldagem TIG e MAG em tandem .....	56
Tabela 5.5	Médias e desvios padrão das áreas para cada processo de soldagem	66
Tabela 5.6	Médias e desvios padrão das penetrações para cada processo de soldagem .....	68
Tabela 5.7	Médias e desvios padrão das larguras para cada processo de soldagem .....	70
Tabela 5.8	Médias e desvios padrão das alturas do reforço para cada processo de soldagem .....	72
Tabela A.1	Gases de proteção e tipos de corrente usuais na soldagem de aço carbono para o processo TIG .....	80

Tabela A.2	Valores típicos de corrente para diferentes diâmetros de eletrodo EWTh-2 para o processo TIG .....	80
Tabela A.3	Gases de proteção sugeridos para o processo TIG .....	80
Tabela A.4	Intervalos de corrente admissíveis para diferentes diâmetros de eletrodo EWTh-2 para o processo TIG .....	81
Tabela A.5	Vazão de gás recomendada em função do material do arame e da corrente para o processo MAG .....	81
Tabela A.6	Diâmetro do bocal em função da vazão selecionada para o processo MAG .....	81
Tabela A.7	Tipo de gás de proteção em função do material de base para o processo MAG .....	81
Tabela A.8	Gases e misturas usados para o processo MAG .....	81
Tabela A.9	Faixas de corrente utilizáveis com arames de diferentes diâmetros para o processo MAG .....	82
Tabela A.10	Intervalos típicos de corrente para bitolas usuais de arames para o processo MAG .....	82
Tabela A.11	Gases de proteção recomendados para diferentes bitolas de arames ER70S-6 para o processo MAG, de acordo com o fabricante .....	82
Tabela B.1	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 01	95
Tabela B.2	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 02	95
Tabela B.3	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 03	96
Tabela B.4	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 04	96
Tabela B.5	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 05	97
Tabela B.6	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 06	97
Tabela B.7	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 07	98
Tabela B.8	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 08	98
Tabela B.9	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 09	99
Tabela B.10	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 10	99
Tabela B.11	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 11	100
Tabela B.12	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 12	100
Tabela B.13	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 13	101
Tabela B.14	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 14	101

Tabela B.15	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 15	102
Tabela B.16	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 16	102
Tabela B.17	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 17	103
Tabela B.18	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 18	103
Tabela B.19	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 19	104
Tabela B.20	Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 20	104

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Alternative Current
AISI	American Iron and Steel Institute
ANOVA	Analysis of Variance
ANSI	American National Standards Institute
AWS	American Welding Society
CCEN	Corrente Contínua Eletrodo Negativo
CLP	Controlador Lógico Programável
DC	Direct Current
DOE	Design of Experiment
FCAW	Flux-Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TDM	Tandem

## LISTA DE SÍMBOLOS

$2^k$	Planejamento fatorial completo
$2^{(k-p)}$	Planejamento fatorial fracionado
$k$	Número de fatores analisados
$n_c$	Número de pontos centrais
$p$	Número de níveis analisados
$\alpha$	Nível de significância

# 1 INTRODUÇÃO

Na primeira metade do século XX, a necessidade de elevar os índices de produção fez com que os processos de fabricação mecânica fossem profundamente investigados, pois as novas tecnologias criadas para um mercado ansioso por artefatos, que facilitariam a vida do ser humano como nunca antes visto, eram requisitadas em todos os lugares do mundo.

Dentre esses processos de fabricação mecânica, destacam-se os processos de soldagem, que experimentaram um constante aumento na sua utilização, desde o advento dos primeiros modos de união de materiais desenvolvidos no começo do século passado. Setores vitais na indústria, tais como o naval, aeronáutico e automobilístico, viram na união de peças e componentes metálicos por juntas soldadas uma alternativa preciosa ao uso de rebites, diminuindo de forma considerável o peso dessas estruturas, além de diminuir drasticamente o tempo necessário para sua fabricação.

O presente trabalho tem como foco principal a pesquisa e o desenvolvimento de processos de soldagem. Mais do que a simples união entre materiais comumente utilizados na indústria, esta pesquisa envolve a união de dois diferentes processos de soldagem por fusão a arco elétrico, neste caso, os processos TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*). Com a combinação destes, procurou-se aliar as vantagens de cada processo, como o arco elétrico concentrado e a ausência de fumos e salpicos do processo TIG, com a alta taxa de deposição e qualidade do acabamento do cordão de solda do processo MAG.

Utilizando um dispositivo para mecanização da operação de soldagem, duas tochas de soldagem, uma TIG e outra MAG, foram dispostas em tandem, com a TIG adiante da MAG, a fim de depositar cordões de solda sobre chapas de aço ao carbono. Com o preaquecimento proporcionado pela tocha TIG logo à frente da MAG é possível atingir penetrações sensivelmente maiores do que cada um dos processos individualmente, além de maior área, largura e altura de reforço do cordão de solda, o que implica em menor número de passes para soldar chapas espessas. Para poder comparar os resultados deste processo de soldagem combinado, também foram executadas operações, empregando os mesmos parâmetros de soldagem, porém com os processos TIG e MAG no modo convencional, ou seja, individualmente. Outrossim, por meio da análise estatística do projeto de experimentos e da análise da variância, a adequação dos parâmetros de soldagem para uma aplicação que requer determinada resposta pode ser feita com maior precisão.

O trabalho divide-se em nove capítulos. No capítulo 2, os objetivos do trabalho e a metodologia utilizada são descritos de forma direta. No capítulo 3, é feita uma revisão bibliográfica de temas pertinentes ao trabalho desenvolvido, com uma atenção especial para a combinação de processos de soldagem. No capítulo 4, são especificados os materiais e equipamentos utilizados para a execução da parte experimental do trabalho e descrevem-se todos os procedimentos adotados para a realização dos cordões de solda. No capítulo 5, os resultados são apresentados e discutidos, considerando a influência de cada parâmetro de soldagem no resultado final. No capítulo 6, com base nas análises feitas no capítulo anterior, são apresentadas as conclusões do trabalho. A sugestão de ideias para trabalhos futuros com base neste encontra-se no capítulo 7. Finalmente, são listadas as referências bibliográficas consultadas e em seguida os anexos apresentam informações complementares deste trabalho.

## 2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

O principal objetivo deste trabalho é investigar a influência dos principais parâmetros de um sistema de soldagem mecanizado, constituído por uma tocha TIG e outra MAG em tandem utilizando aço ao carbono como metal base, sobre a geometria do cordão de solda resultante. Como objetivo secundário, pode-se citar a comparação da geometria dos cordões obtidos utilizando os processos em tandem com os processos TIG e MAG individualmente, unindo a estabilidade e concentração do arco elétrico do processo TIG com a alta taxa de deposição do processo MAG, como forma de identificar um possível campo de aplicação de sua forma combinada.

Para isto, adotou-se a seguinte metodologia:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados, para melhor compreender a combinação de dois ou mais processos de soldagem, especialmente os que envolvem os processos TIG e/ou MAG.
- Aplicação dos conhecimentos obtidos na literatura para definição das variáveis do processo, desenvolvimento e fabricação de ferramental, compreensão das vantagens e limitações do método e influência dos parâmetros na qualidade da solda.
- Especificação de uma metodologia de soldagem para o processo TIG e MAG em tandem e dos processos TIG e MAG convencionais, a partir dos equipamentos disponíveis.
- Execução de cordões de solda empregando os processos de soldagem TIG e MAG em tandem, TIG convencional e MAG convencional, em um dispositivo de soldagem mecanizada, com parâmetros de soldagem definidos.
- Avaliação dos resultados, através de macrografias da geometria dos cordões de solda obtidos pelos processos TIG e MAG em tandem, TIG convencional e MAG convencional.
- Investigação da influência dos parâmetros de soldagem definidos nos resultados. Verificou-se a significância de cada parâmetro e/ou interação entre parâmetros em cada processo de soldagem.
- Comparação das médias e desvios padrão dos valores da geometria do cordão de solda entre os três processos de soldagem.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Processo de Soldagem TIG

O processo de soldagem TIG ou GTAW consiste na união de peças metálicas por meio do seu aquecimento e fusão através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, puro ou composto com outros metais ou óxidos, não consumível, e as peças a unir. A proteção da poça de fusão e do arco elétrico contra a contaminação pela atmosfera é feita por uma atmosfera de gás inerte ou mistura de gases inertes. A soldagem pode ser feita sem metal de adição, no caso, um processo autógeno, ou com uso de metal de adição, diretamente na poça de fusão.

O modo de operação mais usual é o manual. A mecanização da operação não apresenta muitas dificuldades, o que permite obter um processo de soldagem TIG com operação semiautomática ou automática.

O equipamento usado na soldagem TIG é constituído de uma fonte de energia elétrica, normalmente um transformador-retificador, uma tocha de soldagem refrigerada a ar ou água, uma fonte de gás de proteção, um dispositivo para abertura do arco, cabos e mangueiras. A figura 3.1 mostra, esquematicamente, uma representação do equipamento do processo de soldagem TIG.

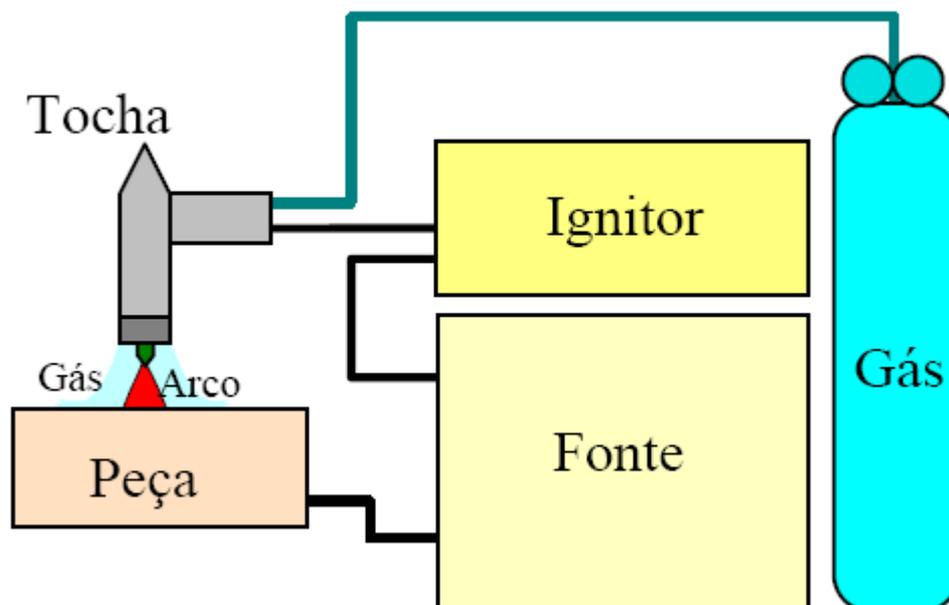


Figura 3.1 – Equipamento para soldagem TIG [Marques et al., 2009].

A proteção gasosa da poça de fusão no processo TIG é eficiente, e ocorre através de um fluxo de gás inerte como o argônio ou o hélio, que parte do bocal de soldagem em direção a poça de fusão. Em alguns casos especiais, gases não inertes podem ser utilizados em pequena quantidade, misturados com o gás inerte [Kou, 2002]. O gás de proteção também impede a oxidação do eletrodo não consumível, pois apesar de o tungstênio fundir em alta temperatura, a sua oxidação ocorre em temperaturas mais baixas. Durante a operação, o eletrodo deve se manter na cor prateada, do contrário, há fuga de gás do sistema, o gás é impuro, ou o restante de gás que permanece no bocal não se mantém ali até que o eletrodo esfrie [Machado, 1996].

O controle da energia transferida para a peça durante a soldagem é uma das principais características desse processo. Ocorre por meio do controle independente que o operador tem da fonte de calor e do metal de adição, que torna o processo adequado para a soldagem de peças de pequena espessura. A ausência de escória permite uma boa visibilidade ao soldador durante o processo, e não gera fumos nocivos. O arco elétrico é bastante estável, concentrado e suave, adequado para produzir soldas com boa qualidade e acabamento, se o soldador for habilidoso. Além disso, o arco elétrico não gera salpicos, pois não há transferência de metal.

Como desvantagem do processo está a baixa taxa de deposição, que implica numa operação mais demorada, se comparada com outros processos de soldagem. Requer uma maior destreza do soldador que os outros processos de soldagem por fusão ao arco elétrico. Não é um processo de soldagem adequado para ambientes turbulentos, com correntes de ar e ventos, pois estes podem interferir na proteção gasosa da poça de fusão e do eletrodo. Devido ao alto custo, é aplicado principalmente na soldagem de metais não ferrosos e aços inoxidáveis, na soldagem de peças de pequena espessura (1,0 a 2,0 mm) e no passe de raiz na soldagem de tubulações.

A fonte de energia é do tipo corrente constante ou tombante, onde uma grande variação na distância da ponta do eletrodo a peça causa uma pequena variação na corrente de soldagem, comum em processos manuais. A polaridade mais usada é a direta, ou corrente contínua com eletrodo negativo, onde a penetração é mais profunda e a largura do cordão é reduzida.

O modo de abertura do arco pode ser feito por meio de um leve toque com a ponta do eletrodo na peça, sem riscar, fechando um curto-circuito, afastando-o em seguida ou por

injeção de alta frequência, quebrando o comportamento dielétrico do ar, e iniciando o processo de soldagem. Riscar o eletrodo na peça pode provocar inclusões de tungstênio no metal de solda e reduz a vida útil do eletrodo.

### **3.1.1 Parâmetros de Soldagem TIG**

A corrente de soldagem é um dos parâmetros com maior influência na penetração do cordão de solda. Quanto mais intensa a corrente de soldagem, maior a penetração. Porém, altas correntes são difíceis de controlar, na soldagem manual, e requerem uma maior velocidade de soldagem. A operação com alta corrente é mais adequada para soldagem mecanizada, semiautomática ou automática. Corrente muito baixa pode causar falta de fusão e baixa penetração, além de dificultar a operação quando se tem metal de adição. A redução da velocidade de soldagem é uma alternativa para trabalhar com baixa corrente [Pritchard, 2001].

A polaridade da corrente afeta tanto a penetração quanto a distribuição do calor entre o eletrodo e a peça. No processo TIG, a operação por corrente contínua com eletrodo na polaridade negativa é mais utilizado para soldagem de aços ao carbono. Assim o calor gerado está 30% no eletrodo e 70% na peça a ser soldada, o que resulta na maior penetração entre as três aplicações. A poça de fusão é estreita e profunda, restringindo o seu emprego em peças muito finas. Ao contrário dos demais, este não produz limpeza de óxidos superficiais na poça de fusão. Na operação por corrente contínua com eletrodo na polaridade positiva, o calor gerado está 70% no eletrodo e 30% na peça a ser soldada, o que resulta numa poça de fusão rasa e larga, com a menor penetração entre as três aplicações. Apresenta uma eficiente remoção dos óxidos superficiais da poça de fusão, pois há oscilação de pontos catódicos sobre a mesma. Na operação por corrente alternada, a distribuição do calor é intermediária e a limpeza de óxidos superficiais é excelente. Indicado para soldagem de alumínio e cobre.

A velocidade de soldagem é proporcional a corrente de soldagem. Maiores velocidades de soldagem requerem correntes de soldagem mais intensas, e para correntes baixas, a velocidade de soldagem deve ser reduzida. Uma velocidade de soldagem mais alta é preferível, visto que esta medida reduz a ocorrência de distorções [Pritchard, 2001].

O comprimento do arco elétrico deve ser o menor possível, porém, se for muito pequeno, este poderá ser contaminado por meio de contato da ponta do eletrodo com a peça a ser soldada. Menor o comprimento do arco, mais concentrado este será. Se o comprimento do

arco elétrico for excessivo, este se distribuirá sobre uma grande área na peça a ser soldada, o que dificulta a fusão devido à queda na intensidade de corrente, além de permitir a entrada de ar atmosférico na poça de fusão, contaminando-a [Pritchard, 2001].

O diâmetro do eletrodo não consumível é proporcional a corrente de soldagem. Eletrodos com maiores diâmetros suportam maiores correntes de soldagem. Para corrente contínua, utilizam-se os eletrodos de tungstênio com óxido de tório, lantânio, ou cério, pois estes não formam uma semiesfera na ponta do eletrodo, mas sim, uma ponta em ângulo. O ângulo da ponta do eletrodo tem relação com a penetração do cordão de solda. Quanto mais agudo o ângulo, maior será a penetração e menor a largura do cordão de solda. A ponta do eletrodo deve ser apontada de modo que as ranhuras da ponta sejam longitudinais em relação ao seu corpo. Para corrente alternada, utilizam-se eletrodos de tungstênio puro ou com óxido de zircônio, pois o calor do arco elétrico torna suas pontas semiesféricas durante o processo de soldagem.

O tipo de gás de proteção influencia na estabilidade do arco elétrico, na geometria do cordão de solda, na proteção da poça de fusão, na transferência de calor e na velocidade de soldagem.

A seleção da correta vazão de gás de proteção é importante, não pode ser deficiente nem excessiva, o que acarretaria em descontinuidades e aumento nos custos de soldagem. A determinação de uma vazão de gás laminar depende do tipo de gás de proteção, da distância do bocal à peça, do tipo de junta, da geometria do bocal, da intensidade de corrente, da existência ou não de deslocamento de ar, da inclinação da tocha, do comprimento do arco elétrico, do tipo de metal de base, da velocidade e posição de soldagem [Machado, 1996].

### **3.2 Processo de Soldagem MIG/MAG**

O processo de soldagem MIG/MAG ou GMAW, caracteriza-se pela geração de um arco elétrico entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco elétrico e da região da solda contra a contaminação pela atmosfera ocorre por meio de um gás ou mistura de gases inertes ou ativos. O processo é denominado MIG quando o gás utilizado é inerte ou uma mistura rica em gases inertes, e MAG quando o gás utilizado é ativo ou uma mistura rica em gases ativos.

O modo de operação é considerado semiautomático, onde o metal de adição tem controle automático, mas com o posicionamento da tocha, início e interrupção da soldagem, e o movimento da tocha de soldagem ao longo da junta, serem executados por controle manual pelo soldador. O processo pode ser mecanizado, com o controle do movimento da tocha de soldagem ao longo da junta pelo equipamento, mas com o posicionamento, acionamento do equipamento e interrupção do processo a cargo do operador de soldagem. A automatização desse processo não apresenta grandes dificuldades, com controle automático de praticamente todas as operações. De uma forma ampla, os sistemas automáticos de soldagem podem ser divididos em sistemas dedicados, projetados para executar uma operação específica de soldagem, basicamente com nenhuma flexibilidade para mudanças nos processos, e em sistemas com robôs, programáveis e apresentando uma flexibilidade relativamente grande para alterações no processo [Marques et al., 2009].

O equipamento para soldagem é constituído por uma fonte de energia, normalmente um transformador-retificador, um sistema de alimentação do arame-eletrodo, tocha de soldagem, fonte de gás de proteção, cabos e mangueiras. Posicionadores e sistema de movimentação da tocha são empregados, para o caso de soldagem mecanizada. A figura 3.2 mostra, esquematicamente, uma representação do equipamento do processo de soldagem MIG/MAG.

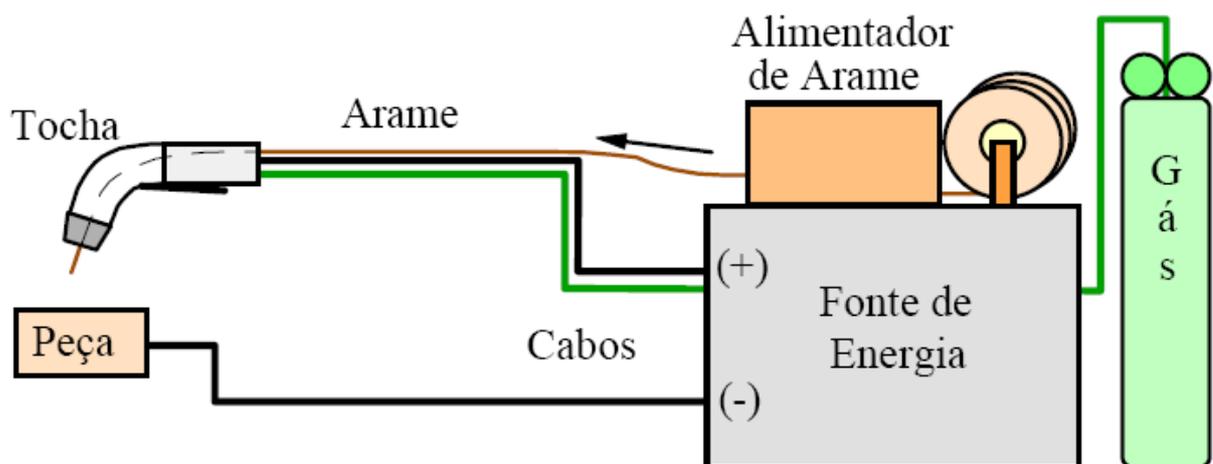


Figura 3.2 – Equipamento para soldagem MIG/MAG [Marques et al., 2009].

A alta taxa de deposição, boa penetração, alto rendimento, formação de pouca ou nenhuma escória, facilidade de operação e possibilidade de operação são algumas das

características do processo. O processo é utilizado para fabricação e manutenção de equipamentos e peças metálicas, recuperação de superfícies desgastadas e no recobrimento de superfícies metálicas com materiais especiais.

A curva característica é do tipo tensão constante ou plana, em que a velocidade de alimentação do arame-eletrodo se mantém constante durante o processo. Devido às variações de distância da ponta do arame-eletrodo à peça, a corrente apresenta variações, de forma que, quando a distância aumenta, a corrente diminui tal qual a taxa de fusão do arame-eletrodo. Quando a distância diminui, ou seja, o soldador aproxima a tocha à peça, a corrente aumenta em relação direta com a taxa de fusão do arame, para proporcionar uma deposição adequada de metal de adição na poça de fusão. Este fenômeno é conhecido por auto ajuste do arco elétrico. No caso de usar curva característica do tipo corrente constante ou tombante, a mesma deverá possuir um sistema tensão sensível acoplado, já que existindo variação no comprimento do arco elétrico, a consequente alteração na tensão será rapidamente corrigida.

A polaridade inversa ou em corrente contínua com eletrodo positivo é a mais utilizada no processo de soldagem MIG/MAG. Polaridade direta ou corrente contínua com eletrodo negativo é utilizada para trabalhos de revestimento, pois a taxa de deposição é maior, entretanto a penetração é reduzida e o arco elétrico apresenta menor estabilidade. Corrente alternada pode ser utilizada, mas a estabilidade do arco elétrico não é boa.

### **3.2.1 Parâmetros de soldagem MIG/MAG**

Os parâmetros de soldagem exercem grande influência sobre a geometria do cordão de solda, suas propriedades mecânicas, defeitos operacionais, estabilidade do arco, qualidade, produtividade e os custos da junta soldada [Karadeniz et al., 2005]. Podem ser classificados em variáveis ajustáveis primárias, que inclui a intensidade de corrente, tensão, e a velocidade de soldagem, e em variáveis ajustáveis secundárias, que engloba a extensão do arame-eletrodo após o bico de contato ou *stickout* e o ângulo de deslocamento da tocha de soldagem. Porém, antes se devem ajustar as variáveis pré-selecionadas, que dependem do tipo metal de base, dos materiais consumíveis e junta adotada. Estas são estabelecidas antes de a soldagem ser iniciada, pois não podem ser alteradas durante a operação e compreendem o diâmetro do eletrodo, o tipo e vazão do gás de proteção.

Inicialmente, o intervalo de corrente admissível para o material e diâmetro do arame-eletrodo empregado deve ser conhecido. Arames-eletrodos de grande diâmetro suportam correntes mais altas, e conseqüentemente apresentam maior penetração e taxa de fusão. Logo, a escolha do diâmetro do arame-eletrodo dependerá da espessura do metal de base, da penetração desejada, sua taxa de deposição, posição de soldagem e a geometria do cordão de solda.

O gás de proteção influi no modo de transferência do metal do arame-eletrodo até a peça, nas propriedades mecânico-metalúrgicas da junta soldada, da geometria e aparência da junta soldada, na estabilidade do arco elétrico, na determinação da máxima velocidade de soldagem, na tendência ao aparecimento de mordeduras, e no custo de operação. A vazão do gás de proteção deve ser laminar, nem turbulento ou deficiente. Se for deficiente, ocorre contaminação da poça de fusão pelo ar atmosférico. Se for turbulento, resultante de uma alta vazão de gás combinada com baixa velocidade de soldagem, ocorre sucção de ar para dentro do arco elétrico. Um ângulo de deslocamento da tocha de soldagem excessivo também pode induzir a penetração de ar sob o arco, não sendo recomendável que o mesmo exceda em torno de 25° [Machado, 1996]. O argônio é o gás de proteção inerte mais utilizado, enquanto que o dióxido de carbono é o gás de proteção ativo mais utilizado. Misturas de gases inertes e ativos são empregadas para se atingir uma determinada geometria de cordão de solda.

Definidas as variáveis pré-selecionadas, parte-se para a seleção dos parâmetros de soldagem, inicialmente, as variáveis ajustáveis primárias. A intensidade da corrente de soldagem influi na taxa de deposição, no modo de transferência, na penetração e no reforço do cordão de solda, consequência direta da relação quase linear da corrente com a taxa de fusão do arame. Em altas correntes isso fica ainda mais evidente no aquecimento do arame-eletrodo após o bico de contato. Nas fontes de energia com curva característica de tensão constante ou plana, o controle da corrente ocorre através da velocidade de alimentação do arame-eletrodo, com a sua relação diretamente proporcional. Se a curva característica fosse do tipo corrente constante ou tombante, o controle da corrente não teria relação com a velocidade de alimentação do arame-eletrodo.

A tensão é um importante parâmetro na determinação da largura do cordão de solda e no modo de transferência do metal do arame-eletrodo até a peça. Estabelecido na própria máquina, no caso de fontes de energia que empregam curva característica de tensão constante, é definida em função da intensidade da corrente, para estabilizar o arco elétrico, além do tipo

de arame-eletrodo, do gás de proteção e da geometria de cordão de solda desejada. Ajustar uma tensão muito baixa pode causar defeitos, como porosidade, sobreposição nas laterais do cordão de solda, e tornar o mesmo estreito e convexo. Tensão muito alta provoca um aumento desproporcional do arco elétrico, o que resulta em porosidade, salpicos e mordedura.

A velocidade de soldagem influi na taxa de deposição e na geometria do cordão de solda. Altas velocidades são utilizadas quando se requer alta produção, porém, ao ultrapassar um limite, podem ocorrer defeitos como trinca por solidificação. Ao manter constantes os demais parâmetros, e aumentar a velocidade de soldagem, a peça ou estrutura soldada apresenta menor deformação, uma zona termicamente afetada mais estreita e grãos refinados na região do metal de solda.

A extensão do arame-eletrodo após o bico de contato e o ângulo de deslocamento da tocha de soldagem são variáveis ajustáveis secundárias, pois podem ser regulados durante a execução da soldagem. O exato resultado da ação dessas variáveis não é geralmente conhecido por antecipação, mas sim tendências, além das mesmas provocarem alteração nas variáveis ajustáveis primárias [Machado, 1996].

Aumentar a extensão do arame-eletrodo após o bico de contato provoca um aumento no aquecimento do eletrodo por efeito Joule e queda na tensão do arco elétrico, resultando em menor penetração e acréscimo na taxa de deposição.

O ângulo de deslocamento da tocha de soldagem influi na penetração do cordão de solda. Tendo como referência o ângulo de  $90^\circ$  e deslocamento da tocha da direita para a esquerda, a alteração no ângulo de deslocamento para o sentido negativo, empurrando a tocha, causa redução da penetração, com o cordão de solda se tornando mais largo e plano. Passando para o sentido positivo, puxando a tocha, ocorre um aumento da penetração, até cerca de  $25^\circ$ , quando esta tende a diminuir. Ângulos maiores que esse pode causar sobreposição na junta e permitir entrada de ar sob o arco elétrico [Machado, 1996].

### **3.3 Processos de Soldagem Combinados**

Os processos de soldagem a arco elétrico podem ser divididos em dois grandes grupos: os processos que utilizam eletrodos não consumíveis ou permanentes, como os processos TIG e plasma, e os processos que utilizam eletrodos consumíveis, como os processos MIG/MAG, arame tubular, arco submerso e eletrodo revestido.

Os processos com eletrodo permanente permitem uma maior independência da taxa de fusão do material de adição em relação à potência do arco. A soldagem pode ser realizada até sem material de adição para determinados materiais e tipos de junta, ou com alimentação manual ou automática de material em forma de varetas ou de arame, com velocidade que pode variar desde valores iguais à zero até um limite superior, determinado pela potência do arco. Esta propriedade permite ao processo de soldagem maior atuação na geometria da solda, caracterizada principalmente pela penetração, largura do cordão e ângulo de molhamento. Entretanto, estes processos têm a tendência de apresentar menor taxa de produção [Oliveira, 2006].

Os processos com eletrodos consumíveis apresentam uma maior produtividade em função da energia transferida à peça não ser somente oriunda da ação do arco voltaico, mas porque o material em transferência do eletrodo à peça conjuga também boa parte da energia transferida. Entretanto, a grande dependência entre a taxa de fusão e a potência do arco passa a ser, em determinadas situações, um inconveniente às propriedades da solda resultante. Como exemplos, podem-se citar a soldagem do alumínio e do cobre, soldagem de peças de grande porte e a soldagem em elevadas velocidades [Oliveira, 2006].

Um modo de aperfeiçoar as vantagens de cada tipo de processo está na combinação de processos de soldagem com eletrodo permanente e com eletrodo consumível. Com isso, tem-se um melhor controle da geometria do cordão de solda dos processos por eletrodo permanente, aliado a produtividade dos processos por eletrodo consumível.

### **3.3.1 Processos de Soldagem Híbridos**

O estudo dos processos de soldagem híbridos teve início na década de 70, com o projeto de uma nova tocha de soldagem, combinando as características dos processos de soldagem Plasma e MIG/MAG [Messler Jr., 2004], porém, as primeiras propostas feitas por D. M. Yenni para esse processo remontam ao final da década de 50 [Oliveira apud Yenni]. A sinergia entre dois processos de soldagem é atualmente um dos grandes focos de estudo na área de produtividade em soldagem.

Um histórico do desenvolvimento de novos processos de soldagem híbridos [Messler Jr., 2004] é apresentado a seguir:

- processo de soldagem híbrido Plasma-MIG, em 1972;

- processo de soldagem híbrido por duplo feixe de elétrons, em 1978;
- processo de soldagem híbrido LASER-TIG, em 1979;
- processo de soldagem híbrido por duplo feixe de LASER, em 1987;
- processo de soldagem híbrido por feixe de LASER assistido por TIG ou MIG/MAG, em 1988;
- processo de soldagem híbrido LASER-MIG, em 1991;
- processo de soldagem híbrido Plasma-LASER, em 1998;
- processo de soldagem híbrido LASER-TIG, com LASER tipo gás, de baixa potência, utilizando dióxido de carbono como meio ativo, em 2001;
- processo de soldagem híbrido com soldagem por fricção FSW assistido por feixe de LASER, em 2002.

Uma definição para processo de soldagem híbrido consiste na combinação de processos de soldagem, onde dois processos de soldagem são acoplados em um único processo, em que estes interagem simultaneamente numa única zona e exercem influência mútua entre si [El Rayes et al., 2004].

Campana [Campana et al., 2007] salienta que, processo de soldagem híbrido tem por base dois processos de soldagem, tecnologicamente diferentes, acoplados juntos.

Graf e Staufer [Graf e Staufer, 2003] afirmam que a combinação de soldagem por feixe de LASER com outro processo de soldagem qualquer é considerado um processo de soldagem híbrido, e significa que o feixe de LASER e o arco agem simultaneamente em uma zona de soldagem, influenciando e auxiliando um ao outro.

Entretanto, alguns autores consideram processo híbrido como a utilização de dois processos de soldagem para a produção de uma junta soldada. É o caso de Taban [Taban et al., 2009], onde se utilizou, inicialmente, o processo Plasma para efetuar o passe de raiz, e posteriormente, o processo TIG para os passes de recobrimento, sobre uma junta de topo.

Entre as vantagens ao se utilizar um processo híbrido de soldagem, com feixe de LASER e outro processo qualquer a arco elétrico, sobre a utilização apenas da soldagem por feixe de LASER, pode-se salientar [Graf e Staufer, 2003]:

- alta estabilidade do processo;
- alta capacidade de formar ponte entre a peça e a tocha de soldagem;
- maior penetração;

- menores custos de investimento de capital financeiro, devido à economia na energia do LASER;
- maior ductilidade.

### **3.3.1.1 Processo de Soldagem Híbrido Plasma-MIG**

O processo de soldagem híbrido Plasma-MIG ou Plasma-GMAW consiste, basicamente, na combinação dos processos plasma e MIG/MAG em uma única tocha. Por meio dessa associação, é possível unir as vantagens de cada processo de soldagem. A maior vantagem reside na independência entre a energia de soldagem imposta pelo processo e o material adicionado, resultando em uma maior facilidade para se obter uma geometria do cordão de solda desejável [Ferraresi e Resende, 2007].

Outros benefícios do processo Plasma-MIG, em relação ao processo MIG/MAG convencional, são o uso de maiores velocidades de soldagem, menor distorção, por apresentar uma menor zona termicamente afetada, melhor aspecto de cordão de solda, com menos respingos e maior penetração [Dykhno e Davis, 2006]. A utilização em robôs industriais de soldagem, que possibilitam operações em altas velocidades, em peças com geometria complexa, também é uma possibilidade [Oliveira, 2006].

No processo de soldagem MIG/MAG e nos outros processos de soldagem por arco elétrico que utilizam eletrodos consumíveis, a corrente de soldagem, a taxa de alimentação do metal de adição e o comprimento do eletrodo estão estreitamente ligados, o que explica a forte dependência entre o aporte de energia e o aporte de material depositado. Como consequência, torna-se difícil trabalhar com a geometria do cordão de solda [Oliveira, 2006].

Por isso, desenvolveram-se variantes de processos de soldagem já conhecidos, de modo que a corrente que flui através do eletrodo consumível possua magnitude diferente da corrente que é efetivamente transferida para a peça de soldagem. No processo Plasma-MIG, uma parte da corrente total de entrada flui para o arame-eletrodo, e a outra parte flui através de um gás ionizado, que envolve o arame-eletrodo, responsável por parte do aquecimento do arame-eletrodo e formação da poça de fusão [Oliveira, 2006].

As primeiras propostas deste processo foram citadas por D. M. Yenni, em 1958 [Yenni, 1958], seguidas por Taver e Shorshov, em 1971, e por Smars, em 1975, onde o arame-eletrodo era incidido perpendicularmente ao arco plasma. Em 1969, Essers e Liefkens

apresentaram outra proposta ao processo, onde o arame-eletrodo é alimentado diretamente no centro do arco plasma, em direção à peça de trabalho [Essers et al., 1981]. Este arranjo permitiu a construção de pistolas mais compactas e simétricas, com melhor praticidade de manutenção e, em função destas características, é atualmente o mais utilizado e difundido [Oliveira, 2006].

O princípio fundamental do processo Plasma-MIG é que o arame-eletrodo, o arco voltaico, as gotas em transferência são envolvidos por uma corrente de gás termicamente ionizado, também denominado de plasma [Oliveira apud Essers, 1981], ao invés de serem envolvidos apenas por um gás inerte ou ativo, como ocorre no processo MIG/MAG. Em outras palavras, o arame-eletrodo e seu respectivo arco elétrico, a parte MIG/MAG do processo, são envolvidos por um gás termicamente ionizado, a parte plasma do processo, formando um arco híbrido [Ferraresi et al., 2008].

No conceito original das tochas de soldagem Plasma-MIG, utiliza-se um eletrodo de tungstênio, o mesmo das soldagens Plasma e TIG, para a geração do arco plasma. Nesse conceito, o eletrodo é localizado ao lado do bico de contato MIG, como ilustrado na figura 3.3. Em função do alto desgaste do eletrodo de tungstênio em atmosferas oxidantes, o gás de plasma utilizado neste tipo de pistola deve ser de natureza inerte. Normalmente, utiliza-se argônio, hélio, ou uma mistura destes, sendo que a utilização de misturas de argônio com gás hidrogênio também é citada na literatura. O gás de proteção pode ser de natureza ativa, já que este fluxo não entra em contato com o eletrodo de tungstênio. Misturas de argônio com dióxido de carbono são empregadas como gás de proteção na soldagem de aços ao carbono. Na soldagem de não ferrosos, normalmente, utiliza-se argônio puro ou misturas com hélio [Oliveira, 2006].

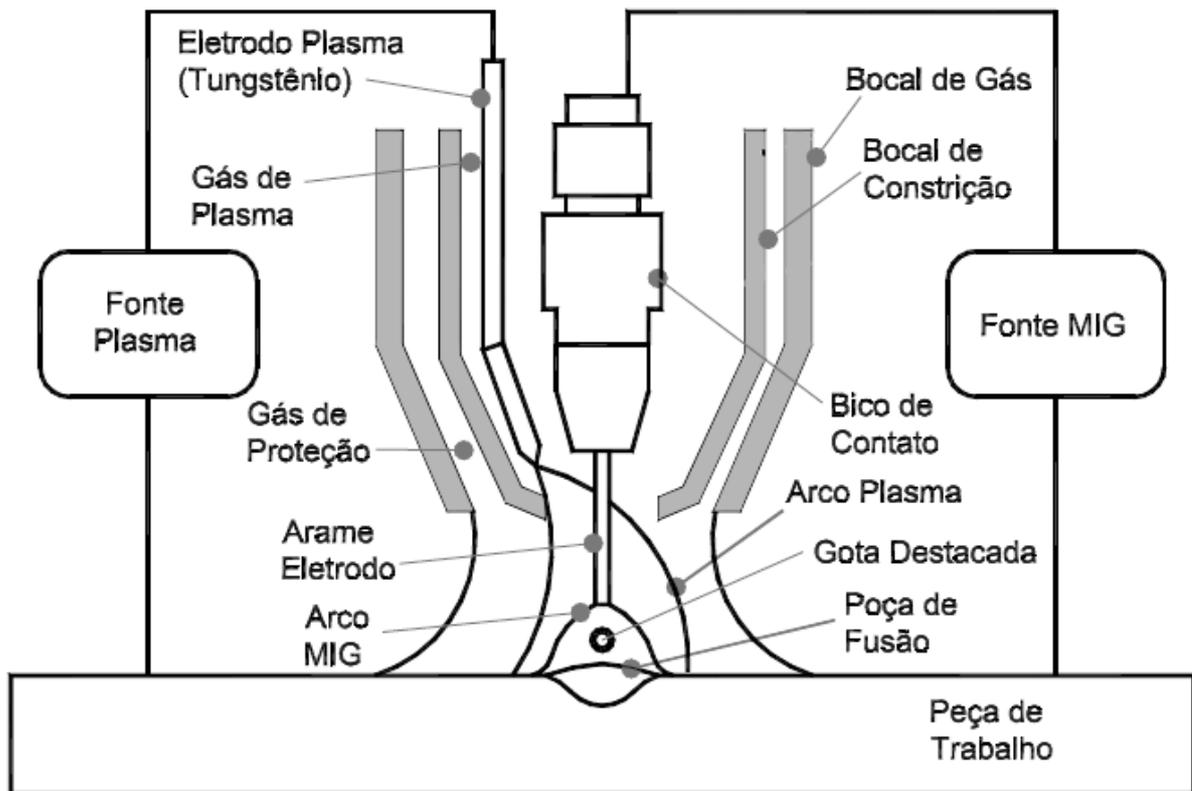


Figura 3.3 – Desenho esquemático do conceito original das tochas de soldagem Plasma-MIG [Oliveira, 2006].

Essers propôs um novo projeto de pistola de soldagem [Essers, 1981], onde o eletrodo de tungstênio pontiagudo é substituído por um eletrodo em forma de anel, conforme a figura 3.4. Este é confeccionado em cobre, e pode ser equipado com um inserto de carbono ou de tungstênio. Esta configuração confere maior rigidez à coluna de plasma e continua sendo utilizada atualmente [Ferraresi e Resende, 2007], além de ser mais compacta, simétrica e apresentar maior facilidade na manutenção [Oliveira, 2006].

Por serem as partes mais importantes da tocha de soldagem, o bocal de constrição, o eletrodo plasma e o bico de contato, devem ser constantemente arrefecidos com água. Como cobre possui um alto coeficiente de condutividade térmica, o arrefecimento do eletrodo plasma garante a manutenção de sua temperatura em níveis baixos, o que impede seu desgaste excessivo, mesmo com a utilização de altas correntes em polaridade reversa, mais adequada para a transferência no processo MIG/MAG, e de gases ativos como o dióxido de carbono e suas misturas com ar [Oliveira, 2006].

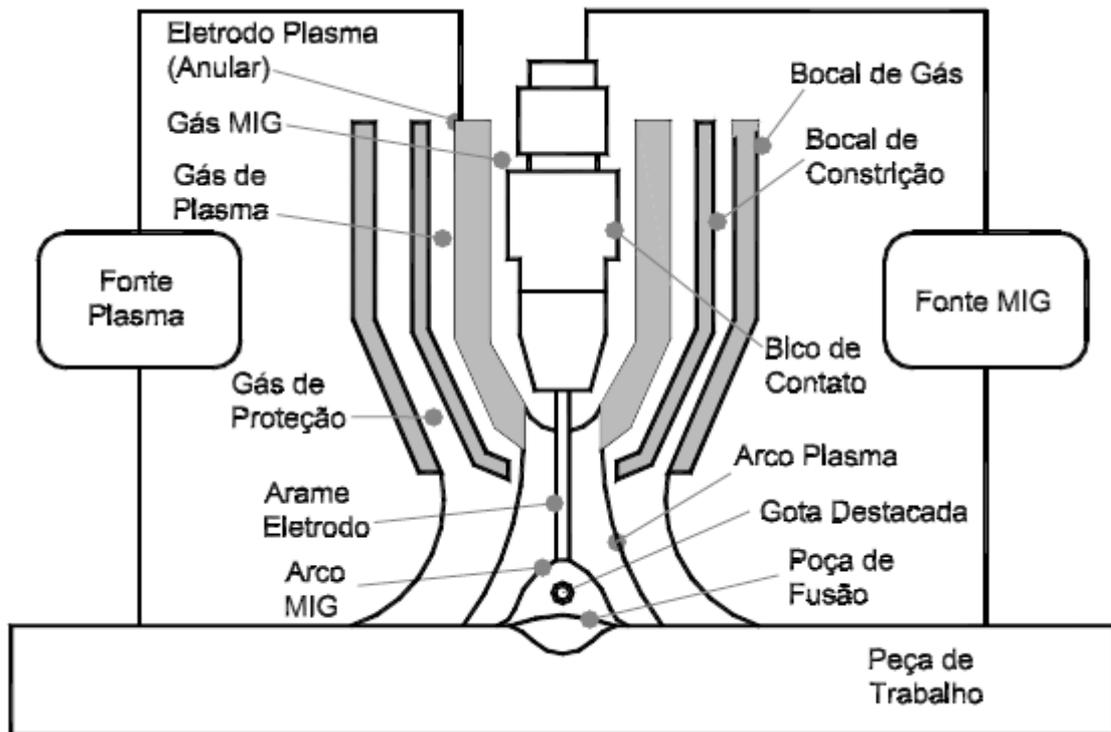


Figura 3.4 – Desenho esquemático de uma tocha de soldagem Plasma-MIG com eletrodo de cobre anular [Oliveira, 2006].

### 3.3.1.2 Processo de Soldagem Híbrido LASER-TIG

No processo de soldagem híbrido LASER-TIG, uma tocha de soldagem TIG é posicionada no eixo de um feixe de LASER. Ambos estão alinhados na mesma direção de soldagem, com a tocha de soldagem TIG adiante do feixe de LASER, conforme a figura 3.5.

O resultado dessa combinação de processos são uma maior penetração e estabilidade do arco elétrico, com menores custos de operação [Liu et al., 2004].

A maior aplicação desse processo está na soldagem de ligas de alumínio e magnésio com alta velocidade de soldagem [Liu et al., 2006].

A aplicação industrial desse processo foi estudada por Yan [Yan et al., 2009], em que juntas de aço inoxidável AISI 304 foram soldadas, onde excelentes propriedades mecânicas foram obtidas, mesmo com os cordões de solda executados com altas velocidades de soldagem.

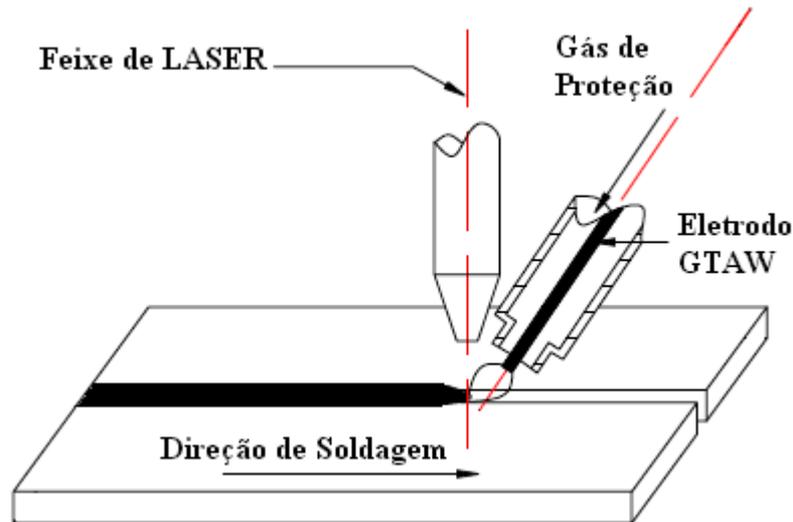


Figura 3.5 – Processo de soldagem híbrido LASER-TIG [Adaptado de Liu et al., 2004].

Liu [Liu et al., 2004] após realizar experimentos sobre chapas de AZ31B, uma liga de magnésio, conclui que esse processo híbrido, em relação ao uso apenas de TIG ou feixe de LASER, proporciona os seguintes efeitos:

- cordões de solda realizados apenas por TIG são mais largos que os por feixe de LASER, logo, os cordões de solda executados pelo processo híbrido LASER-TIG apresentaram uma largura intermediária;
- a penetração do processo híbrido LASER-TIG é duas vezes maior que o processo TIG, e quatro vezes maior que o uso apenas de feixe de LASER. Isso se deve pelo fato de o magnésio ser um material muito condutivo, que diminui a eficiência do processo, limitando a quantidade de energia disponível para o feixe de LASER;
- a estabilidade do processo híbrido LASER-TIG é maior comparada ao processo TIG, especialmente com altas velocidades e baixas correntes;
- o tamanho dos grãos formados pelo processo por feixe de LASER são os menores, enquanto que os formados pelo processo TIG são os maiores. O processo híbrido LASER-TIG resulta em tamanhos de grão intermediários;

Uma limitação do processo híbrido LASER-TIG é a formação de porosidade devida à falta de gás de proteção para o feixe de LASER. Visto que o feixe de LASER não pode ter uma proteção gasosa coaxial ao eixo do feixe, pois este ficaria instável, a solução é a injeção de gás de proteção incidindo lateralmente ao feixe de LASER [Liu et al., 2005].

### 3.3.1.3 Processo de Soldagem Híbrido LASER-MIG

O processo de soldagem híbrido LASER-MIG tem sido um foco de estudos nos últimos anos graças ao seu crescente interesse para o setor industrial, especialmente para a indústria naval e automobilística.

O processo de soldagem por LASER oferece elevada penetração e altas velocidades de soldagem, se comparado a processos de soldagem por arco elétrico [Reutzel et al., 2006]. Soldas realizadas com baixa energia, muito pequena zona fundida e zona termicamente afetada, mínima distorção e tensão residual, altas propriedades mecânicas da junta, altíssima velocidade de soldagem ou de corte, fácil automatização do processo, feixe de LASER não perturbado por campos magnéticos e com alta densidade de potência, possibilidade de operar em juntas de difícil acesso, alto nível de qualidade da junta, capacidade de soldar materiais dissimilares, vaporização de óxidos, silicatos e outras impurezas, metal de adição praticamente não ser necessário na maioria das aplicações, são algumas das vantagens do processo [Machado, 1996].

Entretanto, o processo requer uma preparação de junta de alta precisão, pois o feixe de LASER é muito estreito, o custo do equipamento e de operação é alto, se comparado aos processos de soldagem convencionais, e pelo fato de a energia ser focalizada, o uso do feixe de LASER resulta numa estreita zona termicamente afetada com altas taxas de resfriamento, o que acarreta em perda de ductilidade para certos materiais [Reutzel et al., 2006].

No processo de soldagem MIG/MAG, a composição do metal de adição tem ação benéfica sobre as propriedades do material. O calor adicional gerado por um processo com reduzidas taxas de resfriamento pode melhorar a qualidade do material. Porém, a soldagem de peças mais espessas deve ser feita em múltiplos passes [Reutzel et al., 2006].

A figura 3.6 mostra uma diferença entre a poça de fusão formada pelo processo de soldagem por LASER e pelo processo de soldagem MIG/MAG. Normalmente, o feixe de LASER incide perpendicularmente sobre uma peça plana, e a tocha MIG/MAG está a uma inclinação em torno de  $60^\circ$  com o eixo das abscissas, com uma distribuição gaussiana do seu arco elétrico [Gao et al., 2009].

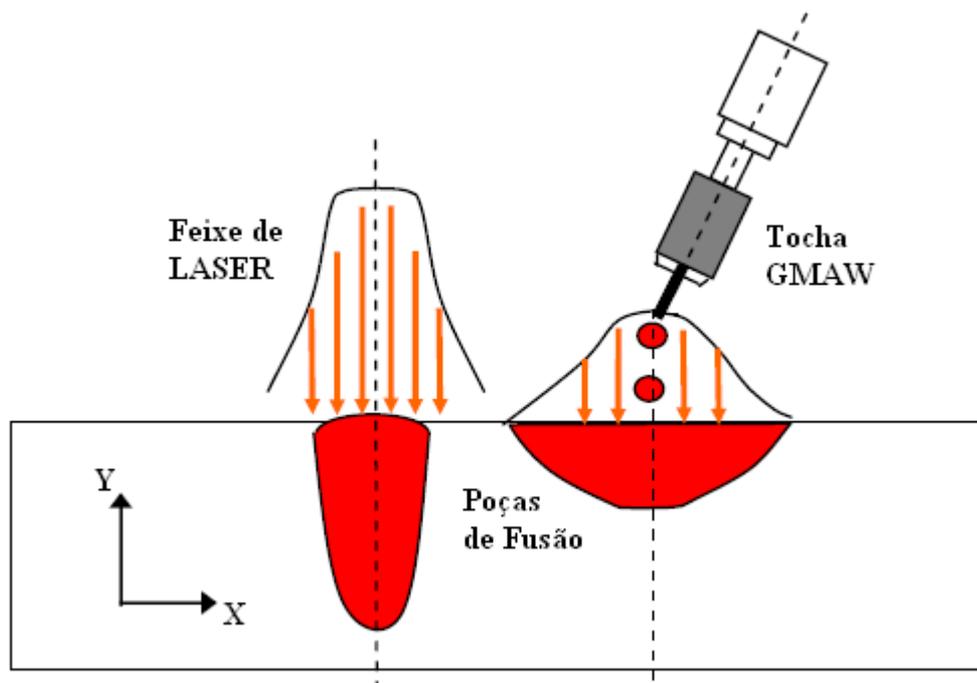


Figura 3.6 – Comparação entre as poças de fusão nos processos de soldagem por LASER e MIG/MAG [Adaptado de Gao et al., 2009].

Para determinadas aplicações, o modo de eliminar as desvantagens de cada processo de soldagem consistiu na união dos processos de soldagem MIG/MAG e LASER. Essa combinação permite uma maior velocidade de soldagem para juntas espessas, que requerem maior penetração em um único passe, o que demandaria o uso de múltiplos passes para um processo de soldagem convencional, o que leva a um benefício adicional, que seria a redução na distorção termomecânica [Reutzel et al., 2006].

Alguns tópicos devem ser levados em conta para se obter uma confiável repetitividade do processo, tais como [Campana et al., 2007]:

- as duas tochas envolvidas no processo devem estar a uma distância de 2 a 3 mm, para evitar turbulência na poça de fusão e distúrbios na formação do *keyhole*, para obter uma boa sinergia entre os processos;
- a posição do foco do feixe de LASER deve ser ajustada sobre a superfície superior do metal de base, para atingir a melhor penetração possível. A distância entre a superfície do metal de base e o foco do feixe de LASER dependerá do modo de transferência desejado para o processo MIG/MAG: 4 a 6 mm para curto-circuito e 6 a 8 mm para aerossol ou arco pulsado;

- o modo de transferência é importante para a estabilidade e repetitividade do processo. Aerossol ou arco pulsado é mais adequado que curto-circuito ou globular;

A tensão do arco elétrico não tem grande influência sobre a penetração do cordão de solda, mas deve ser considerada para melhorar a capacidade de formar a ponte entre a ponta do arame-eletrodo e a peça, estabilizando o arco elétrico.

#### **3.3.1.4 Processo de Soldagem Híbrido Plasma-LASER**

Neste processo de soldagem híbrido, uma fonte de alta potência de LASER tipo sólido Nd:YAG, em que o meio ativo é o neodímio dissolvido numa granate de ítrio e alumínio, é utilizado junto com o processo de soldagem por plasma, para produzir um cordão de solda com formato de rede [Messler Jr., 2004].

Esse processo é possível com operação mecanizada, semiautomática ou automática, com controle por computador do feixe de LASER e do arco de plasma. Apesar de ser um processo ainda em fase de desenvolvimento, ele apresenta um grande potencial, em especialmente no controle preciso da deposição de material e da energia de soldagem [Messler Jr., 2004].

#### **3.3.1.5 Processo de Soldagem Híbrido TIG-MIG**

Outra forma de processo de soldagem híbrido consiste na união de duas tochas de soldagem, uma TIG e outra MIG/MAG, em uma única tocha. Por meio da experimentação, esse tipo de processo proporciona um aumento na velocidade de soldagem, maior penetração, e uma soldagem mais limpa, com menos respingos e melhor aspecto do cordão de solda, ao comparar com o processo de soldagem MIG/MAG convencional [Dykhno e Davis, 2006]. A figura 3.7 mostra um esquema da montagem dessas duas tochas de soldagem.

A operação automática, com uso de robôs, é o foco da maioria das pesquisas, com uma interface eletrônica que estabelece uma sinergia entre as duas tochas, e permite a operação apenas com um dos processos, ou ambos, simultaneamente. Estudos recentes indicam que esse processo híbrido apresenta um melhor desempenho comparado aos processos de soldagem por Plasma e LASER, porém, com menor energia de soldagem. Além disso, a

velocidade de soldagem é maior comparada com o processo de soldagem MIG/MAG convencional [Dykhno e Davis, 2006].

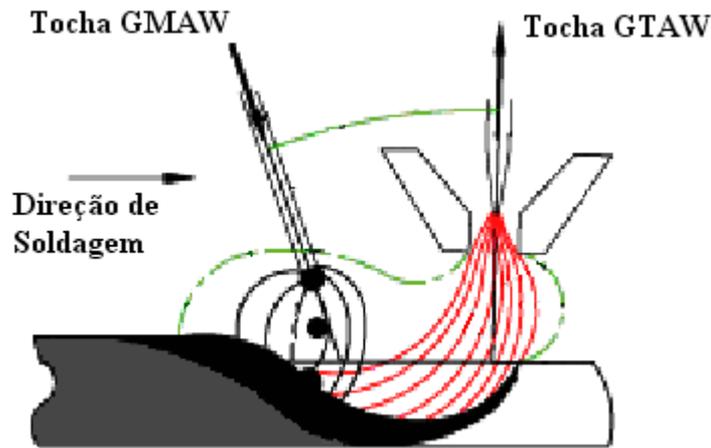


Figura 3.7 – Combinação dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG em um único processo [Adaptado de Dykhno e Davis, 2006].

O princípio de funcionamento do processo está no preenchimento do *keyhole*, formado pelo arco elétrico da tocha TIG, pelo arco elétrico e arame-eletrodo adicionado pela tocha MIG/MAG [Dykhno e Davis, 2006].

O processo TIG utiliza CCEN, para obter maior penetração, e o processo MIG/MAG utiliza CCEP, para a máxima velocidade de soldagem possível e modo de transferência aerossol. As forças magnéticas causam a deflexão nos arcos elétricos para frente da poça de fusão, compensado pela tendência de arraste para trás, durante a soldagem em alta velocidade. O efeito resultante dessa combinação é o aumento na rigidez e estabilidade dos arcos elétricos. Isso resulta em maior penetração e possibilidade de maiores velocidades de soldagem, comparado com o processo de soldagem MIG/MAG convencional [Dykhno e Davis, 2006].

### 3.3.2 Processos de Soldagem em Tandem

Por definição da norma AWS D1.1/D1.1M:2004 – *Structural Welding Code – Steel* – o termo “tandem” refere-se ao arranjo geométrico de eletrodos, em que a linha entre os arcos é paralela à direção de soldagem [AWS, 2004]. Esse arranjo é comum em processos de

soldagem que requerem alta produtividade e velocidade de soldagem, exigindo um alto grau de mecanização ou até mesmo automatização.

### 3.3.2.1 Processo de Soldagem por Arco Submerso em Tandem

Uma aplicação de cabeçotes de soldagem em tandem muito usual é na soldagem por arco submerso em tandem com dois ou três eletrodos. Nesse modo de operação, há dois ou três eletrodos soldando simultaneamente, acoplados em diferentes cabeçotes, formando arcos elétricos distintos, ligados a uma fonte de energia separada. Normalmente, o segundo e terceiro eletrodos são acoplados a fontes de corrente alternada [Wainer et al., 1992].

Segundo Marques [Marques et al., 2009], os arames formam arcos elétricos distintos, podendo ser usados arranjos com até seis arames e técnica *twin-arc*, em que dois arames finos são alimentados simultaneamente, formando um único arco elétrico. Em ambas as técnicas, o uso de arames múltiplos aumenta a taxa de deposição, conforme mostrado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Taxas de deposição possíveis com diferentes processos e técnicas de soldagem [Marques et al., 2009].

Processo de Soldagem	Taxa de Deposição (kg/h)*
SMAW	0,5 a 3,0
GMAW	1,0 a 8,0
FCAW	2,0 a 12,0
SAW (um arame)	3,0 a 20,0
SAW (dois arames)	12,0 a 40,0

\*Taxas aproximadas, ciclo de trabalho de 100%.

### 3.3.2.2 Processo de Soldagem MIG/MAG em Tandem

Sistemas de soldagem MIG/MAG em tandem têm sido desenvolvidos especialmente para usufruir o potencial de altas velocidades de soldagem e taxas de deposição utilizando dois ou mais eletrodos em uma poça de fusão. Esses sistemas empregam duas fontes de soldagem, dois carretéis de arame-eletrodo, e um sistema de controle CLP.

A figura 3.8 mostra um esquema de um sistema de soldagem MIG/MAG em tandem.

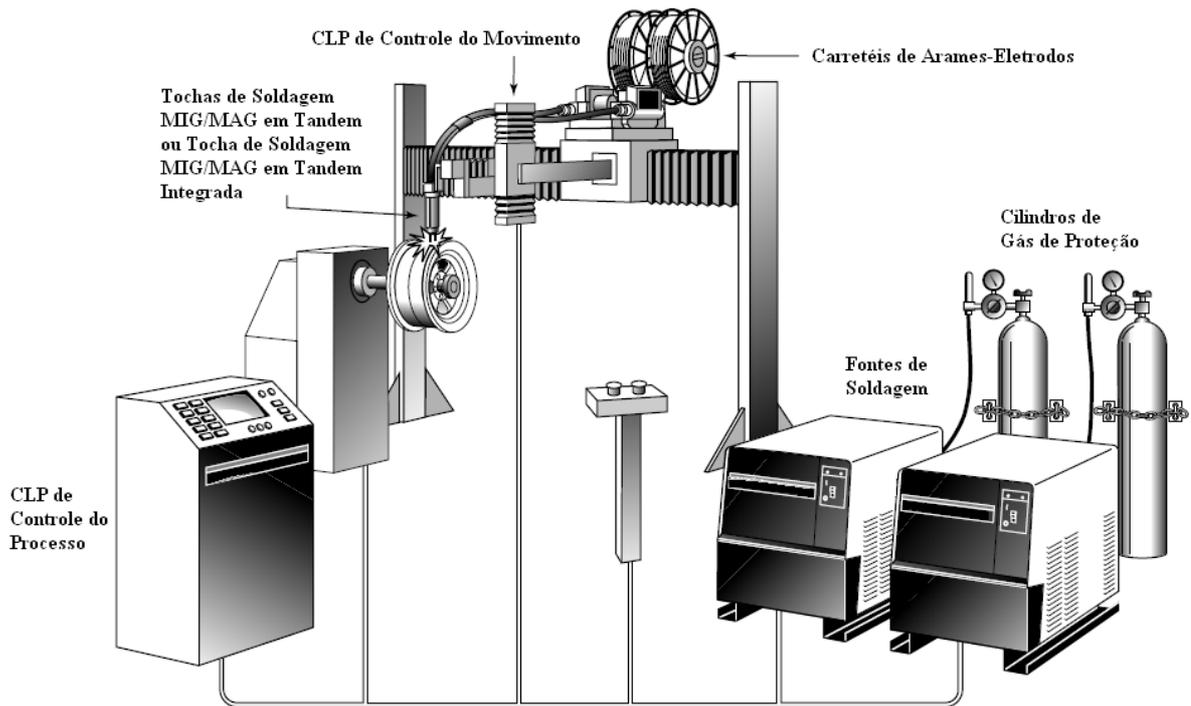


Figura 3.8 – Esquema de um sistema de soldagem MIG/MAG em tandem [Adaptado de Lincoln Electric, 2010].

As principais vantagens desse processo em relação ao MIG/MAG convencional, com um único eletrodo, são as seguintes:

- altas velocidades de soldagem sobre chapas de metal;
- menor deposição de hidrogênio no cordão de solda;
- menor índice de salpico, se comparado com outros processos de soldagem e modos de transferência de metal;
- soldagem com alta taxa de deposição, mesmo com chapas grande espessura;
- pode ser utilizada para soldagem fora de posição.

Os modos de transferência de metal por aerossol e pulsado são os mais utilizados, inclusive combinações destes, tais como:

- aerossol e pulsado: transferência por aerossol no arco elétrico do primeiro arame-eletrodo, seguido por transferência por arco pulsado no segundo arame-eletrodo;
- pulsado e pulsado: transferência por arco pulsado em ambos os arames-eletrodo. É o modo mais adequado quando o objetivo é obter alta velocidade de soldagem;

- aerossol e aerossol: transferência por aerossol em ambos os arames-eletrodo. Por envolver maior energia de soldagem, essa configuração é adequada para alta penetração em chapas espessas.

O alinhamento das tochas de soldagem é muito importante para a operação correta, bem como para a repetitividade do processo. O eixo central entre as tochas deve ser normal à peça de soldagem. A distância entre os eletrodos também é importante, pois maiores velocidades de soldagem serão atingidas quanto menor for à distância entre as tochas de soldagem.

A distância do bico de contato a peça influencia na velocidade de soldagem. Para altas velocidades de soldagem, a distância recomendada é de 16 mm. Para chapas mais espessas, essa distância pode chegar a 25 mm [Lincoln Electric, 2010].

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A soldagem das chapas utilizando os processos TIG, MAG, TIG e MAG em tandem foi executada no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC) da UFRGS, que disponibilizou o equipamento e materiais consumíveis necessários. O corte, polimento e ataques químicos dos corpos de prova foram realizados no Laboratório de Metalografia da FURG que disponibilizou o equipamento necessário. Neste capítulo são descritos os materiais e procedimentos adotados em todas as etapas do trabalho.

### 4.1 Material Utilizado

Na realização deste trabalho, todos os procedimentos de soldagem foram executados em chapas de aço ao carbono AISI 1010, com 6,3 mm de espessura. A caracterização do material foi feita através de análise química por espectrografia junto ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, em temperatura ambiente de 21 °C e umidade relativa do ar de 51%. A composição química do material é indicada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química do aço ao carbono AISI 1010 (percentual em massa).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
% em massa	0,11	0,334	0,45	0,0103	0,0034	0,0639	<0,005	0,0157	0,0381	<0,01
Elemento	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Fe	
% em massa	<0,01	0,0018	0,0018	<0,001	<0,01	<0,002	<0,001	<0,0001	99,0	

### 4.2 Preparação dos Corpos de Prova para a Soldagem

A preparação dos corpos de prova para a soldagem consistiu no corte das chapas utilizando uma guilhotina. Em seguida foi executado o lixamento da superfície das mesmas para eliminar a presença de eventuais locais com oxidação. As dimensões escolhidas foram tais que permitissem a retirada de corpos de prova com tamanho adequado para facilitar o trabalho de polimento, além de facilitar a visualização da zona termicamente afetada.

#### **4.2.1 Corpos de Prova para Soldagem em Tandem**

Para a soldagem pelos processos TIG e MAG em tandem foram preparados corpos de prova nas dimensões 300 x 150 mm. Como o objetivo deste trabalho compreende o estudo da geometria do cordão de solda resultante da deposição dos processos de soldagem, não houve necessidade de preparação de chanfro.

Foram preparadas vinte e seis chapas, das quais seis chapas foram usadas para execução de pré-testes, para definir os parâmetros de soldagem mais adequados, enquanto que as demais foram reservadas para a soldagem com os parâmetros já definidos.

Os pré-testes foram executados de acordo com os parâmetros selecionados nos pré-testes dos processos TIG e MAG individualmente. A escolha destes ocorreu pela análise da aparência do cordão de solda através de inspeção visual.

#### **4.2.2 Corpos de Prova para Soldagem TIG e MAG**

Para a soldagem pelos processos TIG e MAG individualmente foram preparados corpos de prova nas dimensões 300 x 150 mm. Como a análise individual de cada processo serviu para comparar os seus resultados com os do processo em tandem, logo os cordões de solda TIG e MAG foram executados na mesma chapa, sendo que no primeiro estágio o sistema mecanizado de soldagem percorrendo metade do comprimento da chapa apenas com a tocha TIG operando, e no segundo estágio, no comprimento final da chapa, apenas com a tocha MAG em atividade.

Foram preparadas vinte e quatro chapas, das quais duas chapas foram usadas para execução de pré-testes para o processo TIG, e outras duas chapas para execução de pré-testes para o processo MAG.

A função dos pré-testes é definir os parâmetros de soldagem mais adequados, com base na aparência do cordão de solda. Esses parâmetros serviram de base para a definição dos utilizados no processo TIG e MAG em tandem.

#### **4.3 Equipamentos Utilizados**

Para a execução deste trabalho, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Equipamento de soldagem TIG: fonte de soldagem marca White Martins, modelo SOLTIG 350 AC/DC, conforme a figura 4.1 (a).
- Equipamento de soldagem MAG: fonte de soldagem marca Migtronic, modelo BDH 550, conforme a figura 4.1 (b).



(a)



(b)

Figura 4.1 – Fontes de soldagem: (a) White Martins SOLTIG 350 AC/DC; (b) Migtronic BDH 550.

- Bancada de soldagem mecanizada: para a execução dos cordões de solda de todos os processos, utilizou-se um dispositivo de soldagem mecanizada mostrada na figura 4.2,

com suporte para as tochas TIG e MAG, com transmissão por meio de um fuso, movido por um motor elétrico monofásico da marca Aster, com potência de 1,2 cv, tensão de 110 V, com rotação nominal de 4300 rpm, e relação de transmissão de 1:32. A velocidade de avanço máxima é de 12,4 mm/s.



Figura 4.2 – Bancada de soldagem mecanizada.

- Máquina de corte *cut-off*: equipamento da marca Mesoton, para efetuar o corte transversal das amostras.
- Macrografias: escâner da marca Brother, modelo MFC-8890DW, para obter as imagens das análises macrográficas do metal de base e das soldas com resolução de 600 dpi. As dimensões do cordão de solda foram obtidas através do software ImageJ.

#### 4.4 Consumíveis

Foram utilizados os seguintes materiais consumíveis para a execução deste trabalho:

- Gás argônio: para a tocha TIG, empregou-se o gás argônio como gás de proteção, armazenado em um cilindro de 11 m<sup>3</sup>.
- Gás dióxido de carbono: para a tocha MAG, empregou-se o gás dióxido de carbono, armazenado em um cilindro de 25 kg.
- Carretel de arame-eletrodo MAG: utilizou-se um carretel de arame-eletrodo marca Böhler, modelo EMK 6 D, tipo ER70S-6 de acordo com a norma AWS A5.18-05, com diâmetro de 1,2 mm. Este arame-eletrodo de cobre sólido é considerado próprio para aplicações gerais em solda MAG para aços ao carbono com uso de 100% de dióxido de carbono como gás de proteção. As tabelas 4.2 e 4.3 apresentam a análise química e os ensaios mecânicos do arame-eletrodo realizados pelo fabricante.

Tabela 4.2 – Análise química do arame-eletrodo (percentual em massa).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
% em massa	0,078	0,829	1,406	0,007	0,018	0,004	0,003	0,028	0,006	0,004

Tabela 4.3 – Ensaio mecânicos do arame-eletrodo.

Limite Elástico	400 MPa
Resistência à Tração	480 MPa
Alongamento	22 %
Resistência ao Impacto	27 J a 30 °C

- Eletrodo de tungstênio não consumível: utilizou-se um eletrodo de tungstênio com óxido de tório EWTh-2, diâmetro de 2,4 mm, com um mínimo de 97,3% de tungstênio, 1,7 a 2,2% de óxido de tório e 0,5% de outros elementos.
- Lixas: foram usadas lixas d'água, da marca Norton, nas granulometrias 100, 180, 320, 400 e 600, para polimento das amostras dos corpos de prova.
- Álcool etílico absoluto: utilizou-se álcool etílico da marca Synth, com pureza de 99,5% para os ataques metalográficos das amostras dos cordões de prova.

- Acetona pura: utilizada para a limpeza da superfície das chapas de aço ao carbono e para remoção de esmalte das amostras dos corpos de prova.
- Discos de corte: foram usados três discos de corte da marca Skill Tec, para cortar materiais de dureza até 40 Rockwell C, para efetuar os cortes transversais dos corpos de prova.
- Spray de esmalte: utilizou-se spray de esmalte, da marca Struers, para proteção das amostras dos corpos de prova para protegê-los contra a oxidação após o ataque metalográfico.

#### **4.5 Procedimento de Soldagem**

Para o desenvolvimento deste trabalho, dois processos de soldagem foram utilizados, TIG e MAG. Além do uso destes dois processos individualmente, também foram realizados testes com os processos operando simultaneamente, com a disposição das tochas de soldagem em tandem, sendo que a tocha TIG percorria o caminho de soldagem adiante da tocha MAG. A figura 4.3 mostra um esquema de todo o conjunto de equipamentos envolvidos na execução das soldas.

Inicialmente, realizava-se o processo em tandem, e posteriormente, uma solda com o sistema funcionando apenas com o processo TIG e depois apenas com o processo MAG. Nos dois últimos casos, os parâmetros de soldagem eram os mesmos adotados no processo em tandem, para permitir a comparação dos resultados dos processos operando simultaneamente e individualmente.

A soldagem dos corpos de prova para as três modalidades de processo ocorreu em duas etapas, sendo que a primeira etapa consistiu em testes preliminares, a fim de definir os parâmetros adequados para a soldagem. A segunda etapa consistiu na soldagem dos corpos de prova em definitivo de acordo com a ordem estabelecida no projeto de experimentos.

A soldagem utilizando os processos TIG e MAG convencionais serve como uma referência para os resultados obtidos no processo TIG/MAG em tandem. Portanto, conseguiu-se detectar as limitações e vantagens no TIG e MAG em tandem idealizado.

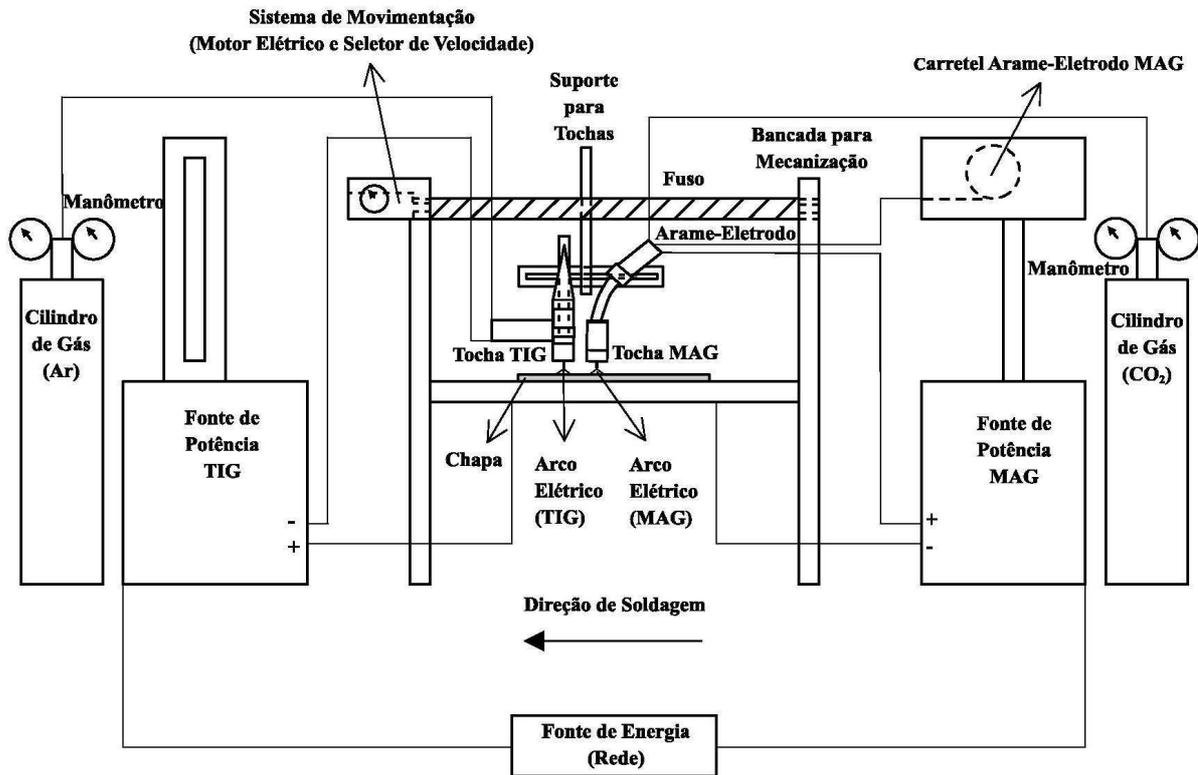


Figura 4.3 – Esquema dos equipamentos envolvidos na execução dos cordões de solda.

A comparação dos resultados ocorreu através da análise da geometria do cordão de solda. Para isso, foram feitas macrografias da seção transversal dos cordões de solda de todas as amostras, e mediu-se a área, penetração, largura e reforço de solda de cada amostra. Através dos resultados da geometria do cordão, com o auxílio do software Minitab 16, foi feita uma análise dos resultados no projeto de experimentos, verificando-se a influência de cada parâmetro de soldagem na área, penetração, largura e reforço do cordão de solda. A figura 4.4 mostra as dimensões características avaliadas.

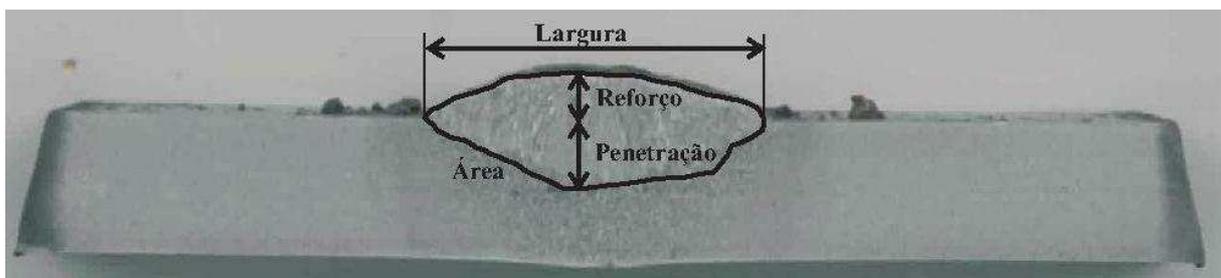


Figura 4.4 – Dimensões do cordão de solda.

#### 4.5.1 Definição de Parâmetros de Soldagem para os Processos TIG e MAG

Para definir parâmetros de soldagem adequados e obter soldas com qualidade aceitável, testes preliminares foram realizados nos corpos de prova, a fim de adquirir dados qualitativos. A determinação dos parâmetros de soldagem para os processos TIG e MAG tiveram por base os seguintes fatores:

- presença de descontinuidades detectadas através de inspeção visual.
- emprego da maior corrente de soldagem possível.
- emprego da maior velocidade de soldagem possível.
- visualização da linha de solda na raiz, para verificar se houve ou não penetração total.
- qualidade e acabamento do cordão de solda.

Logo, todas as modificações nos equipamentos, fabricação de suportes para as tochas e nos parâmetros de soldagem foram decorrentes dos parâmetros acima citados.

As soldas foram realizadas em chapas com dimensões 150 x 300 mm e frequentemente mais de um cordão de solda executado numa mesma chapa. Antes de iniciar a soldagem, as chapas foram lixadas para remoção dos óxidos na superfície.

A soldagem para ambos os processos foi realizada de forma semiautomática, na posição plana, com a tocha TIG executando o pré-aquecimento e a tocha MAG depositando metal de adição sobre a chapa de aço ao carbono (*bead-on-plate*). A bancada de soldagem permitiu a mecanização do procedimento com velocidade de soldagem constante, a fim de obter soldas de boa qualidade, com propriedades uniformes e repetitividade do processo.

Os parâmetros adotados para os pré-testes tiveram como base experiências anteriores destes processos feitas no LS&TC, informações disponíveis na literatura [Machado, 1996; Marques et al., 2009] e, para o processo MAG, de parâmetros recomendados pelo fabricante do arame-eletrodo, conforme as tabelas A.1 a A.11 do anexo I. Nas tabelas 4.4 e 4.5 são descritos os parâmetros definitivos de soldagem para os processos TIG e MAG, respectivamente, após a execução dos pré-testes.

A escolha das distâncias da ponta do eletrodo a peça teve por base o limite recomendável de não posicionar a ponta do eletrodo a distância de uma vez e meia superior ao valor do seu diâmetro, para aumentar o rendimento térmico e evitar a contaminação pelos gases da atmosfera [Machado, 1996].

Tabela 4.4 – Parâmetros de soldagem definitivos para o processo MAG.

Velocidade de alimentação de arame	6,0 – 6,5 – 7,0 (m/min)
Tensão	26 – 29 – 32 (V)
Corrente (CCEP)	140 – 170 – 190 (A)
Diâmetro do bocal	15 mm
Tipo de arame	ER70S-6
Diâmetro do arame	1,2 mm
Distância bico de contato – peça	20 mm
Vazão de gás de proteção (CO <sub>2</sub> )	15 l/min

Tabela 4.5 – Parâmetros de soldagem definitivos para o processo TIG.

Corrente (CCEN)	150 – 200 – 250 (A)
Distância ponta do eletrodo - peça	2,0 – 2,5 – 3,0 (mm)
Diâmetro do eletrodo	2,4 mm
Tipo de eletrodo	EWTh-2
Ângulo de ponta do eletrodo	45°
Material do bocal	Cerâmico
Diâmetro do bocal	12 mm
Vazão de gás de proteção (Ar)	12 l/min

#### 4.5.2 Definição de Parâmetros de Soldagem para os Processos TIG e MAG em Tandem

Definidos os parâmetros de soldagem para os processos TIG e MAG convencionais, estabeleceram-se também os parâmetros para ambos os processos em tandem. Assim como para a etapa anterior, testes preliminares foram feitos nos corpos de prova para obter dados qualitativos. No caso dos processos TIG e MAG operando simultaneamente em tandem, a determinação dos parâmetros de soldagem teve por base os seguintes fatores:

- presença de descontinuidades detectadas através de inspeção visual.
- visualização da linha de solda na raiz, para verificar se houve ou não penetração total.
- qualidade e acabamento do cordão de solda.
- montagem e acomodação dos cabos e mangueiras das tochas de soldagem na bancada.
- evitar os efeitos de deflexão eletromagnética entre os arcos elétricos.
- alinhamento correto entre as tochas de soldagem.

As velocidades de soldagem escolhidas foram as que obtiveram os melhores desempenhos nos processos TIG e MAG convencionais. Neste caso, escolheram-se valores que apresentaram resultados satisfatórios comuns para ambos os processos.

Devido a limitações de espaço da bancada de soldagem, as tochas TIG e MAG ficaram fixas num ângulo de 90° com a chapa de aço ao carbono.

No caso da distância entre as tochas, procurou-se estabelecer a mais próxima possível. A presença de deflexão eletromagnética e o limite de espaço físico foram os fatores determinantes para a escolha da distância mínima.

Na tabela 4.6 são representados os parâmetros definitivos para o processo com as tochas TIG e MAG em tandem.

Tabela 4.6 – Parâmetros de soldagem comuns aos processos TIG e MAG em tandem.

Velocidade de soldagem	4,5 – 5,0 – 5,5 (mm/s)
Distância entre tochas	30 – 40 – 50 (mm)

### 4.5.3 Preparação do Projeto de Experimentos

Os processos de soldagem podem ser representados conforme o modelo da figura 4.5. Neste caso, os parâmetros definidos seriam as variáveis de entrada, os processos de soldagem TIG, MAG e TIG/MAG em tandem, e as variáveis de saída com os parâmetros de resposta. Alguns dos parâmetros do processo são controláveis, sendo outros não controláveis [Haas apud Montgomery, 2009].

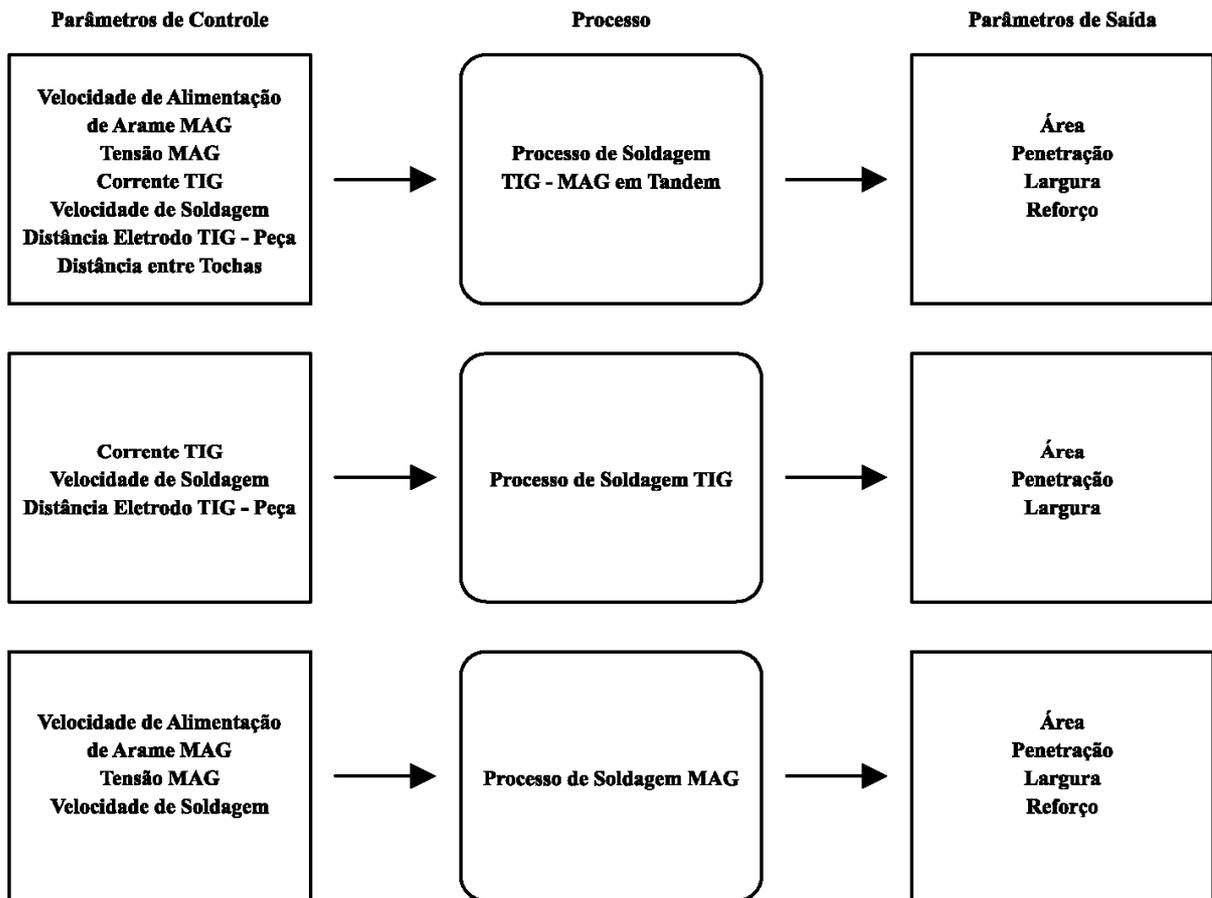


Figura 4.5 – Parâmetros de controle, processo e parâmetros de saída.

Devido à ausência de dados preliminares e escassez de literatura sobre experiências do processo em tandem, optou-se por um projeto de experimentos utilizando o método fatorial fracionado, que permite uma análise adequada do processo com poucos experimentos. Neste modelo, utilizaram-se dois níveis, em que cada fator assume um valor máximo e um valor mínimo, e quatro pontos centrais.

Por meio da combinação do número de fatores analisados  $k$ , do número de níveis  $p$  e do número de pontos centrais  $n_c$ , consegue-se determinar o número de ensaios. Na medida em que aumenta o número de fatores, aumenta também o número de ensaios. A tabela 4.7 apresenta os parâmetros analisados, níveis mínimos, máximos e intermediários.

Tabela 4.7 – Parâmetros analisados, níveis mínimos, máximos e intermediários.

Parâmetro	Nível mínimo	Nível intermediário	Nível máximo
Velocidade de alimentação de arame MAG (m/min)	6,0	6,5	7,0
Tensão MAG (V)	26	29	32
Corrente TIG (A)	150	200	250
Velocidade de soldagem (mm/s)	4,5	5,0	5,5
Distância do eletrodo a peça TIG (mm)	2,0	2,5	3,0
Distância entre tochas (mm)	30	40	50

A determinação do número de ensaios ocorre através da seguinte relação:

$$2^{k-p} + n_c \rightarrow 2^{6-2} + 4 = 2^4 + 4 = 16 + 4 = 20 \quad (1)$$

Logo, determina-se o número de ensaios, como sendo igual a 20 experimentos. Por meio do projeto de experimentos, chega-se a condição otimizada do processo, permitindo avaliar o impacto dos parâmetros de entrada escolhidos na resposta final (parâmetros de saída) do processo.

A adição de pontos centrais ao planejamento fatorial permite obter uma estimativa dos erros obtidos, e consistem em operações replicadas no centro do planejamento, utilizando apenas os valores dos níveis intermediários, sem relacioná-los com os níveis mínimos e máximos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas diferentes etapas do trabalho são apresentados neste capítulo, bem como a discussão pertinente aos mesmos. Os três processos de soldagem são analisados: processo TIG e MAG em tandem, processo TIG e processo MAG.

A geometria do cordão de solda foi o resultado cuja análise caracterizou as soldas obtidas pelos diferentes processos. Amostras foram retiradas dos corpos de prova, e por meio de análise metalográfica os dados referentes à área, penetração, largura e reforço do cordão de solda foram obtidos para cada processo.

A análise do projeto de experimentos para cada uma das respostas (área, penetração, largura e reforço do cordão de solda) para cada um dos três processos de soldagem (TIG, MAG e TIG e MAG em tandem) foi feita para determinar qual fator e/ou interação entre fatores é significativa para cada processo e parâmetro de saída.

Por fim, realizou-se a análise da variância entre as respostas de cada processo de soldagem, para comparar os resultados entre cada processo.

### 5.1 Soldagem TIG

Definidos os parâmetros de soldagem para o processo TIG, as soldas foram realizadas nas chapas de aço ao carbono para posterior corte dos excessos de material nas laterais dos cordões de solda, corte das amostras, polimento e ataque químico com reagente Nital 10%.

O aspecto visual dos cordões de solda (conforme o anexo II) mostra que se obtiveram cordões de solda com qualidade satisfatória.

O planejamento do projeto de experimentos fatorial fracionado é descrito na tabela 5.1, onde estão expostos os fatores, resultados, experimentos e ordem aleatória em que estes foram executados.

No caso do projeto de experimentos, utilizou-se um planejamento de resolução IV, em que nenhum efeito principal está associado com nenhum outro efeito principal ou com interações de segunda ordem, porém interações de segunda ordem estão associadas entre si [Montgomery e Runger, 2009].

O uso do software Minitab permitiu determinar a análise da influência dos fatores na resposta. Utilizou-se um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para valores de alfa ( $\alpha$ )

menores que 5% a variável de controle em questão é significativa na resposta. É importante salientar que quanto menor for o valor de alfa, maior a influência do parâmetro na resposta analisada.

A altura do reforço do cordão de solda para o processo TIG é nula, por tratar-se de um processo autógeno. Entretanto, pela pressão do arco elétrico houve deslocamento de metal acima da linha da superfície do material de base.

Tabela 5.1 – Planejamento fatorial fracionado do experimento ( $2^{6-2} + 4$ ) e resultados obtidos para o processo de soldagem TIG.

Experimento	Ordem aleatória de execução	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Distância eletrodo a peça (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
8	1	150	5,5	3,0	3,78	1,19	5,17	0,00
6	2	150	4,5	2,0	6,98	1,81	5,53	0,00
7	3	250	4,5	3,0	11,31	2,06	7,82	0,00
10	4	200	5,0	2,5	7,09	1,53	6,66	0,00
9	5	250	5,5	2,0	9,84	1,95	7,62	0,00
14	6	250	5,5	2,0	8,89	1,75	6,83	0,00
11	7	150	4,5	2,0	4,42	1,30	4,77	0,00
12	8	250	4,5	3,0	10,25	1,84	6,89	0,00
13	9	150	5,5	3,0	2,75	0,99	3,90	0,00
15	10	200	5,0	2,5	7,62	1,68	4,09	0,00
20	11	200	5,0	2,5	6,07	1,50	5,93	0,00
16	12	150	4,5	3,0	4,15	1,27	4,83	0,00
17	13	250	4,5	2,0	9,94	1,86	7,29	0,00
19	14	250	5,5	3,0	7,40	1,27	6,72	0,00
18	15	150	5,5	2,0	3,00	1,30	3,78	0,00
4	16	250	5,5	3,0	7,83	1,61	8,24	0,00
3	17	150	5,5	2,0	6,81	2,03	6,04	0,00
2	18	250	4,5	2,0	12,03	2,43	6,97	0,00
1	19	150	4,5	3,0	5,88	1,86	6,21	0,00
5	20	200	5,0	2,5	7,22	1,64	5,51	0,00

### 5.1.1 Análise da Área do Cordão de Solda para o Processo TIG

As figuras 5.1 e 5.2 exibem o gráfico da probabilidade normal e o diagrama de Pareto, respectivamente, onde se observa que a corrente e a velocidade de soldagem têm efeito significativo sobre a área do cordão de solda, enquanto que a distância do eletrodo a peça e interações dos parâmetros não exercem influência sobre a área do cordão de solda.

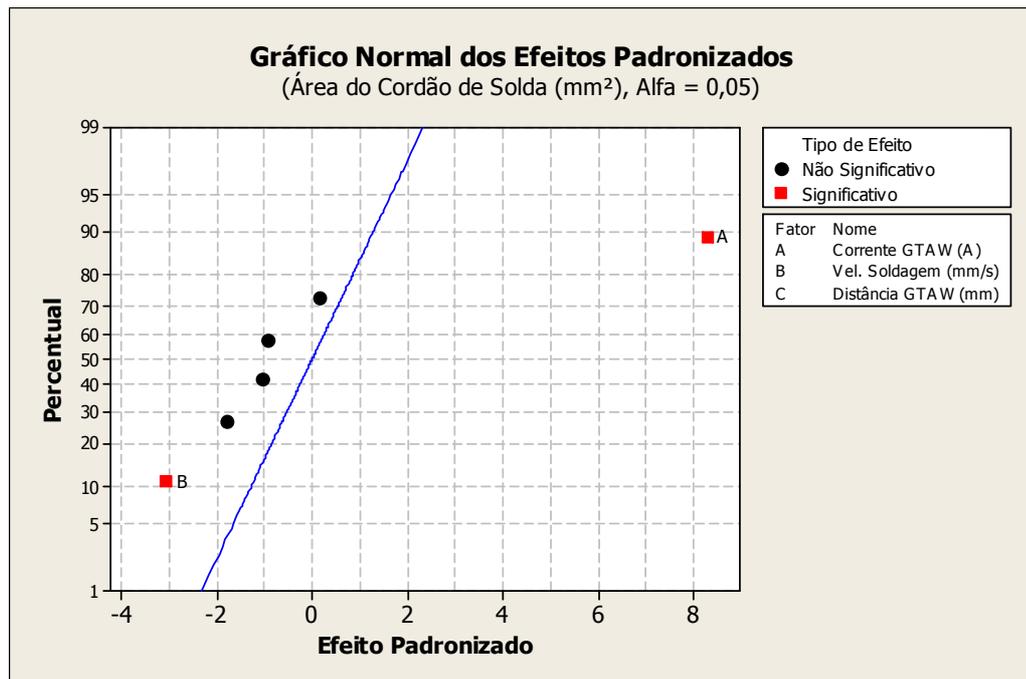


Figura 5.1 – Gráfico da Probabilidade normal para a área do cordão de solda do processo TIG.

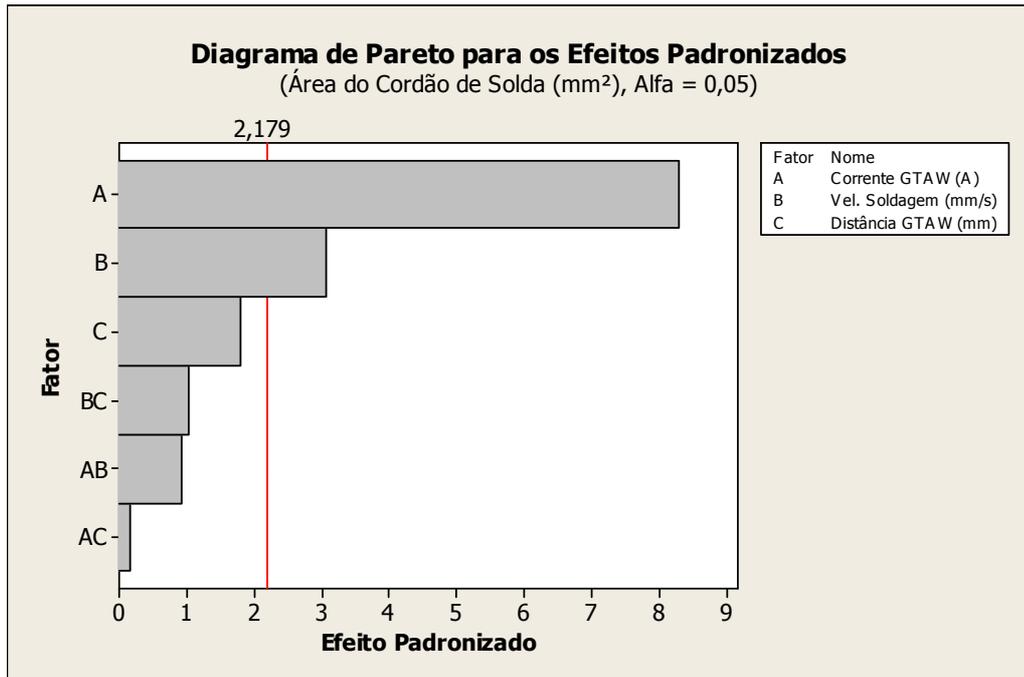


Figura 5.2 – Diagrama de Pareto para a área do cordão de solda do processo TIG.

Pelo gráfico da probabilidade normal, o valor máximo para a área do cordão de solda ocorre quando a corrente está em seu nível máximo (250 A) ou a velocidade de soldagem está em seu nível mínimo (4,5 mm/s).

### 5.1.2 Análise da Penetração do Cordão de Solda para o Processo TIG

De acordo com o gráfico da probabilidade normal (figura 5.3) e o diagrama de Pareto (figura 5.4), nota-se que apenas a corrente exerce influência significativa sobre a penetração do cordão de solda para o processo TIG. Os demais parâmetros e suas interações não exercem influência significativa na penetração do cordão de solda.

Pelo gráfico da probabilidade normal, a maior penetração ocorre quando a corrente de soldagem está em seu nível máximo (250 A).

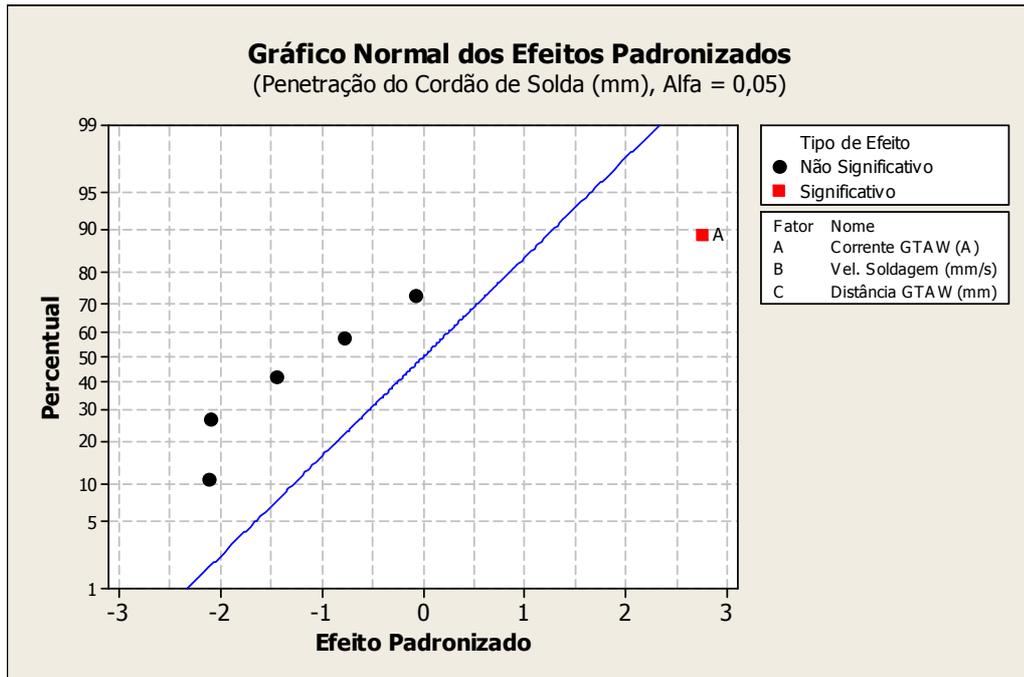


Figura 5.3 – Gráfico da probabilidade normal para a penetração do cordão de solda do processo TIG.

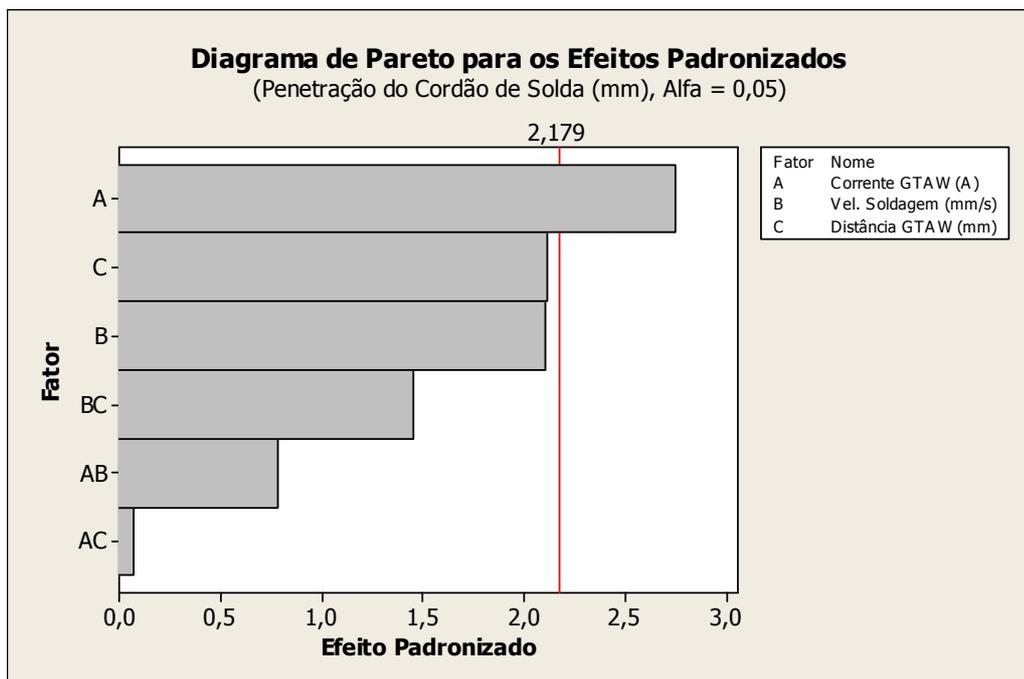


Figura 5.4 – Diagrama de Pareto para a penetração do cordão de solda do processo TIG.

### 5.1.3 Análise da Largura do Cordão de Solda para o Processo TIG

De acordo com o gráfico da probabilidade normal (figura 5.5) e do diagrama de Pareto (figura 5.6), nota-se que apenas a corrente exerce influência significativa sobre a largura do cordão de solda para o processo TIG. Os demais parâmetros e suas interações não exercem influência significativa na largura do cordão de solda.

A largura máxima ocorre quando a corrente de soldagem está em seu nível máximo (250 A).

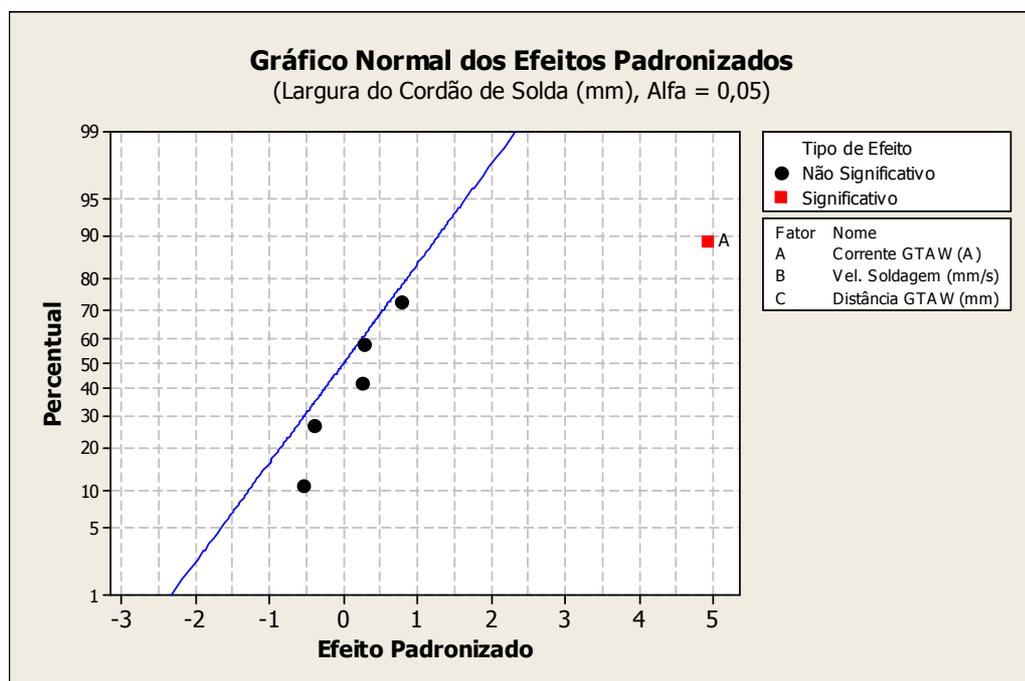


Figura 5.5 – Gráfico da probabilidade normal para a largura do cordão de solda do processo TIG.

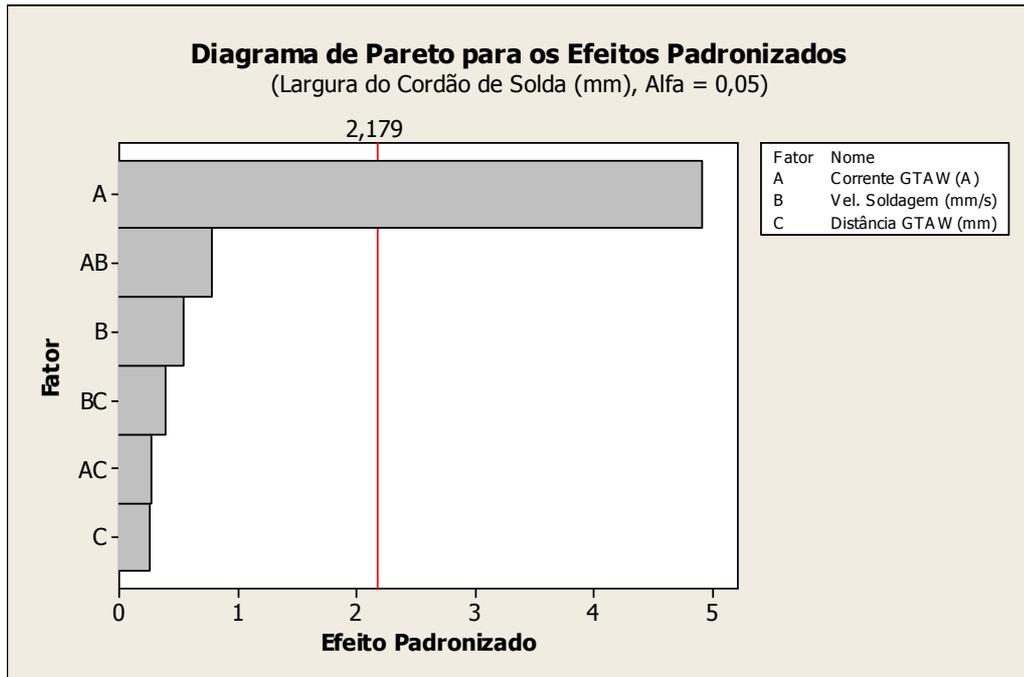


Figura 5.6 – Diagrama de Pareto para a largura do cordão de solda do processo TIG.

## 5.2 Soldagem MAG

Definidos os parâmetros de soldagem para o processo MAG, as soldas foram realizadas nas chapas de aço ao carbono para posterior corte dos excessos de material nas laterais dos cordões de solda, corte das amostras, polimento e ataque químico com reagente Nital 10%.

O aspecto visual dos cordões de solda (conforme o anexo II) mostra que se obtiveram cordões de solda com qualidade satisfatória. Observaram-se descontinuidades ao longo dos cordões de solda, onde a presença de salpicos merece destaque, pois praticamente todos os cordões de solda apresentaram este problema, detectado através de inspeção visual. Pelo fato de as correntes utilizadas terem ficado abaixo de 200 A, as transferências metálicas no processo foram do tipo curto-circuito, caracterizada pelo constante processo de extinção e reabertura do arco elétrico e com o inconveniente de gerar uma grande quantidade de salpicos [Haas apud Quites, 2002].

O planejamento do projeto de experimentos fatorial fracionado é descrito na tabela 5.2, onde estão expostos os fatores, resultados, experimentos e ordem aleatória em que estes foram executados.

Tabela 5.2 – Planejamento fatorial fracionado do experimento ( $2^{6-2} + 4$ ) e resultados obtidos para o processo de soldagem MAG.

Experimento	Ordem aleatória de execução	Velocidade de alimentação (m/min)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
8	1	7,0	26	5,5	34,76	2,97	8,69	3,36
6	2	6,0	26	4,5	38,21	2,96	10,70	3,42
7	3	7,0	32	4,5	54,57	3,56	15,16	2,88
10	4	6,5	29	5,0	38,07	3,13	12,16	2,48
9	5	6,0	32	5,5	38,40	2,60	12,76	2,80
14	6	7,0	26	5,5	37,08	3,01	8,87	3,66
11	7	7,0	32	4,5	55,01	3,25	14,54	2,97
12	8	6,0	26	4,5	36,71	2,97	10,51	2,80
13	9	6,0	32	5,5	36,46	2,54	11,46	2,43
15	10	6,5	29	5,0	37,55	3,14	10,97	2,56
20	11	6,5	29	5,0	33,39	2,80	10,63	2,45
16	12	7,0	26	4,5	44,76	3,42	10,67	3,95
17	13	6,0	32	4,5	39,57	2,23	12,39	2,85
19	14	7,0	32	5,5	38,69	2,71	12,62	2,67
18	15	6,0	26	5,5	24,66	2,37	7,85	2,77
4	16	6,0	26	5,5	28,11	2,54	9,49	2,83
3	17	7,0	32	5,5	39,93	3,11	11,52	3,16
2	18	7,0	26	4,5	51,33	3,92	12,31	3,62
1	19	6,0	32	4,5	41,23	2,40	13,81	2,88
5	20	6,5	29	5,0	36,05	2,97	10,50	2,68

Assim como o projeto de experimentos para o processo TIG, utilizou-se um planejamento de resolução IV, bem como o software Minitab para determinar a influência dos fatores na resposta, com um intervalo de confiança de 95%. A significância de um fator ou interação entre fatores é válida para valores de alfa menores que 5% ( $P < 5\%$ ).

### 5.2.1 Análise da Área do Cordão de Solda para o Processo MAG

De acordo com o gráfico da probabilidade normal (figura 5.7) e o diagrama de Pareto (figura 5.8), nota-se que a velocidade de alimentação de arame, a tensão, a velocidade de

soldagem e a interação entre a velocidade de alimentação de arame e a velocidade de soldagem exercem efeitos significativos sobre a área do cordão de solda para o processo MAG. As interações entre a velocidade de alimentação de arame e a tensão, a tensão e a velocidade de soldagem, não exercem efeitos significativos.

De acordo com o gráfico da probabilidade normal, a área do cordão de solda para o processo MAG é maximizada empregando a velocidade de alimentação de arame ou a tensão em seus níveis máximos (7 m/min e 32 V, respectivamente), e a velocidade de soldagem em seu nível mínimo (4,5 mm/s).

Na figura 5.9, observa-se a interação entre a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação de arame. Neste caso, o máximo valor de área é resultado da interação entre o nível mínimo da velocidade de soldagem (4,5 mm/s) e o nível máximo da velocidade de alimentação de arame (7 m/min). Com a velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem nos níveis mínimos (6 m/min e 4,5 mm/s, respectivamente), se consegue uma área do cordão de solda maior do que se utilizassem estes mesmos parâmetros, nos seus níveis máximos (7 m/min e 5,5 mm/s, respectivamente). O menor valor para área do cordão de solda é obtido com a velocidade de soldagem em seu nível máximo (5,5 mm/s) e velocidade de alimentação de arame em seu nível mínimo (6 m/min).

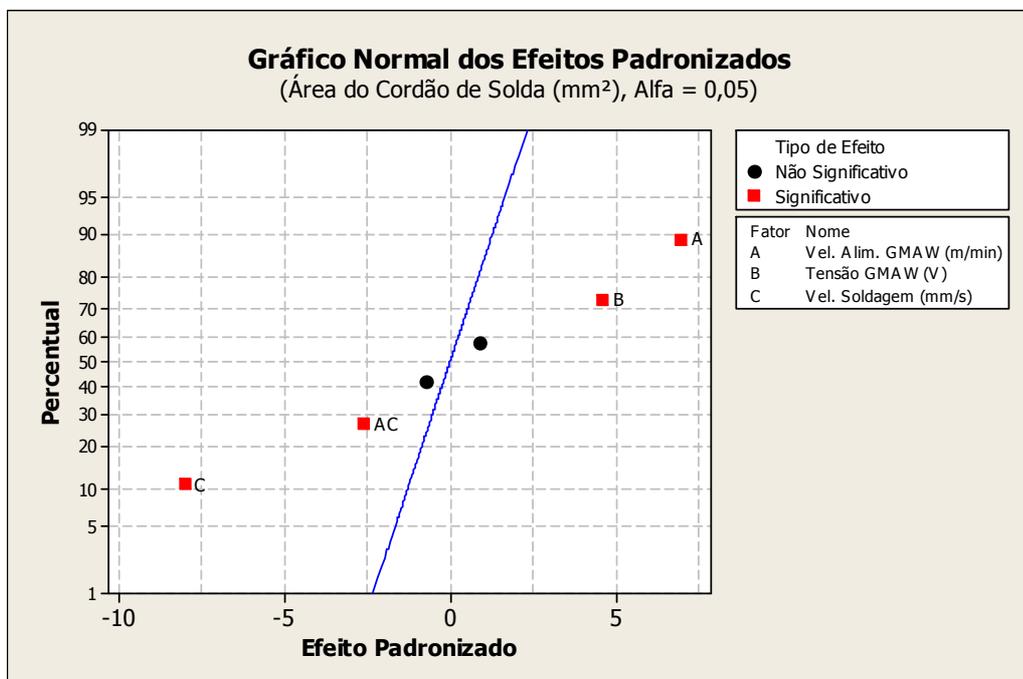


Figura 5.7 – Gráfico da probabilidade normal para a área do cordão de solda do processo MAG.

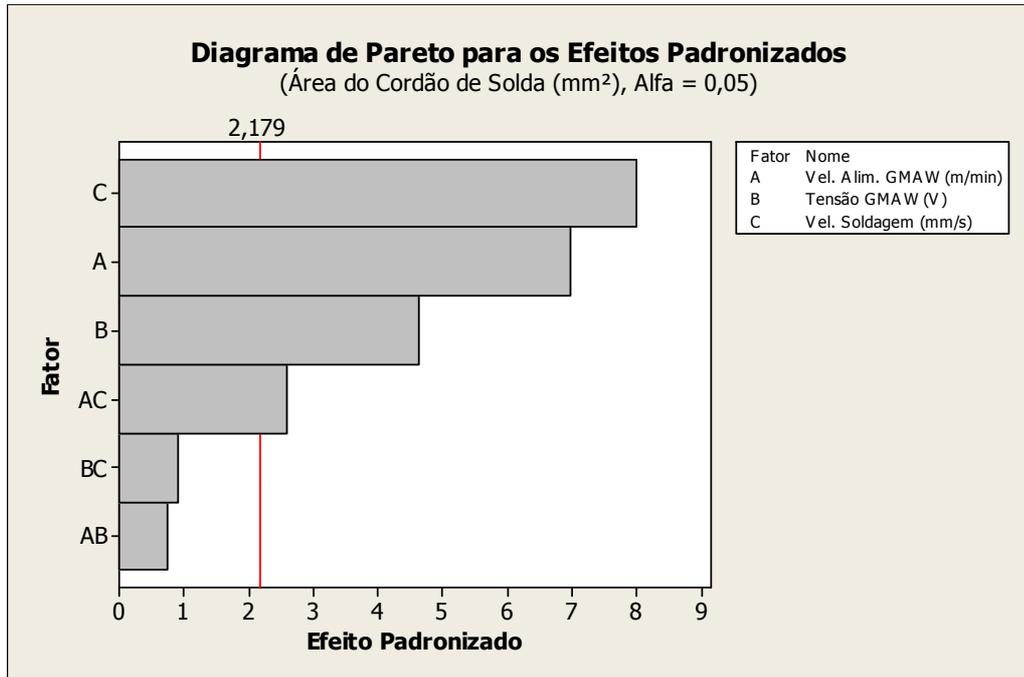


Figura 5.8 – Diagrama de Pareto para a área do cordão de solda do processo MAG.

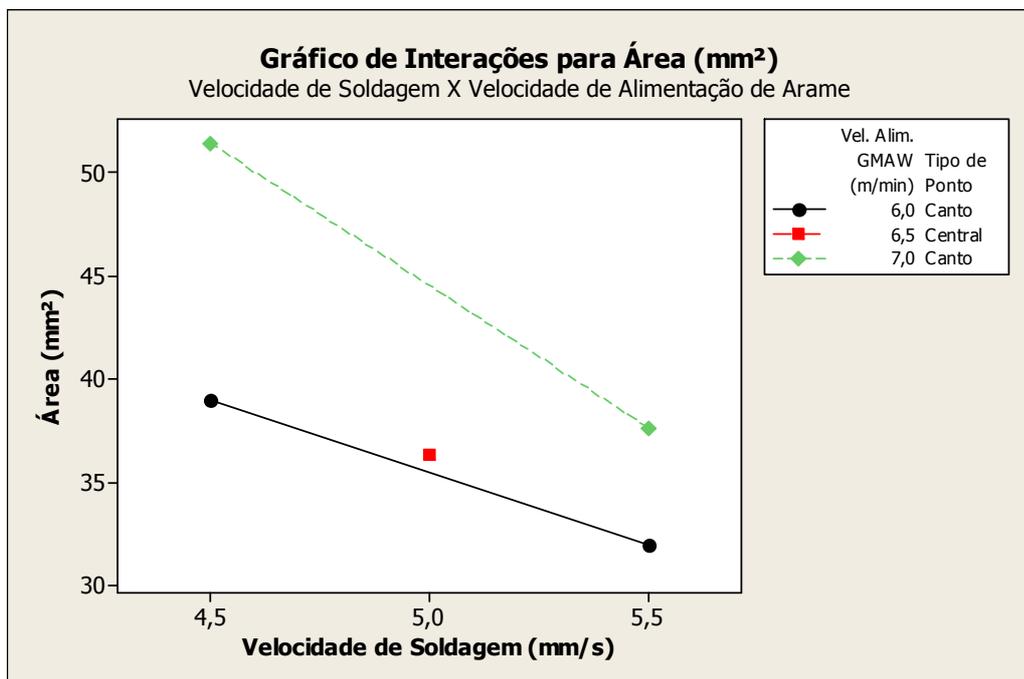


Figura 5.9 – Interação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame na área do cordão de solda do processo MAG.

### 5.2.2 Análise da Penetração do Cordão de Solda para o Processo MAG

De acordo com o gráfico da probabilidade normal (figura 5.10) e o diagrama de Pareto (figura 5.11), nota-se que a velocidade de alimentação de arame, a tensão, a velocidade de soldagem, a interação entre a velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem, e a interação entre a tensão e a velocidade de soldagem exercem efeitos significativos sobre a penetração do cordão de solda para o processo MAG. A interação entre a velocidade de alimentação de arame e a tensão é o único efeito não significativo para esse processo de soldagem.

De acordo com o gráfico de probabilidade normal, a penetração é máxima quando a velocidade de alimentação de arame estiver no nível máximo (7 m/min), ou a tensão ou a velocidade de soldagem estiverem em seus níveis mínimos (26 V e 4,5 mm/s, respectivamente).

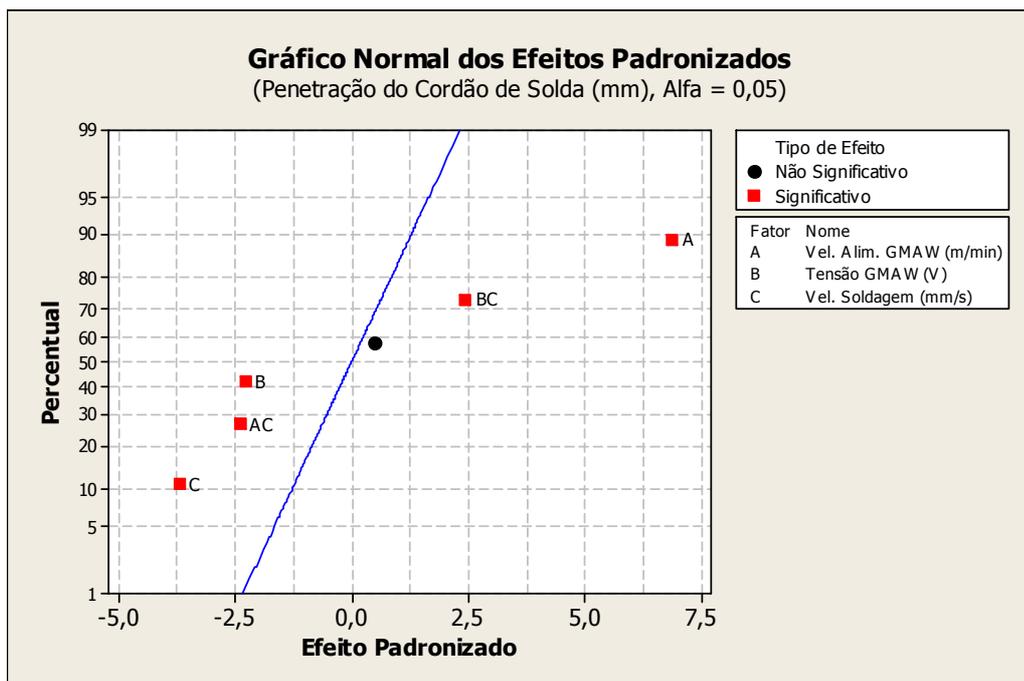


Figura 5.10 – Gráfico da probabilidade normal para a penetração do cordão de solda do processo MAG.

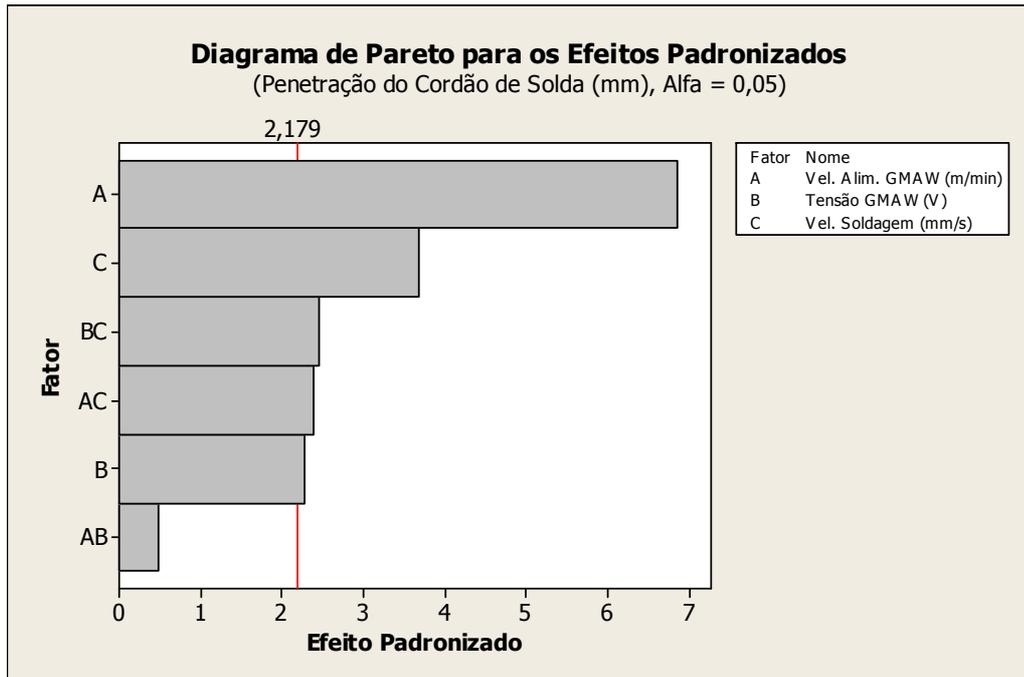


Figura 5.11 – Diagrama de Pareto para a penetração do cordão de solda do processo MAG.

Na figura 5.12 observa-se a interação entre a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação de arame. A penetração máxima é obtida com a combinação do nível mínimo da velocidade de soldagem (4,5 mm/s) e o nível máximo da velocidade de alimentação de arame (7 m/min). A penetração mínima ocorre com a velocidade de soldagem em seu nível máximo (5,5 mm/s) e a velocidade de alimentação de arame em seu nível mínimo (6 m/min).

Na figura 5.13 observa-se a interação entre a tensão e a velocidade de soldagem. Consegue-se a penetração máxima combinando os valores mínimos da velocidade de soldagem (4,5 mm/s) e da tensão (26 V). A penetração mínima é obtida com o nível máximo da velocidade de soldagem (5,5 mm/s) e o nível mínimo da tensão (26 V).

De acordo com Machado [Machado, 1996], para aços ao carbono, a máxima penetração ocorre para uma velocidade de soldagem em torno de 7 mm/s, enquanto que o nível máximo da velocidade de soldagem nesse estudo (5,5 mm/s) resultou em penetração menor que o nível mínimo (4,5 mm/s), mais distante do valor indicado.

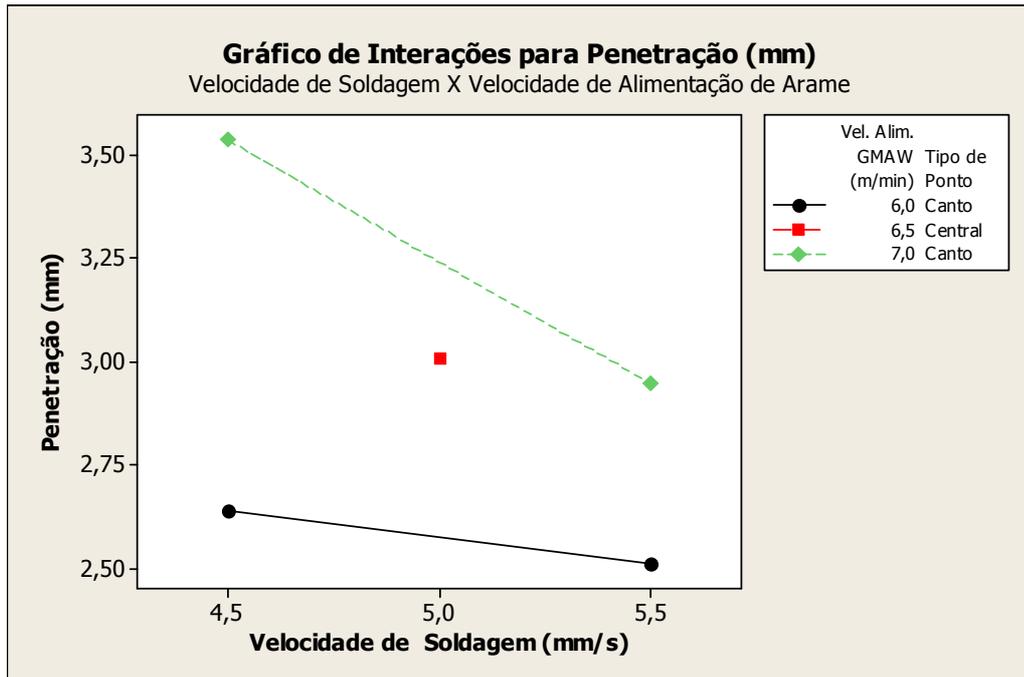


Figura 5.12 – Interação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame na penetração do cordão de solda do processo MAG.

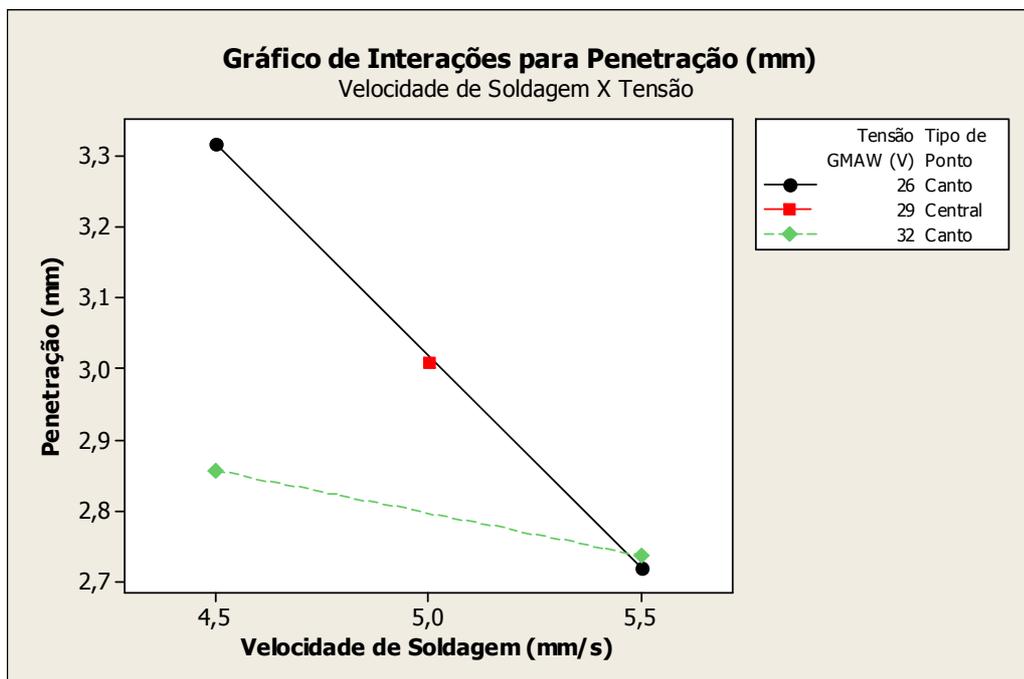


Figura 5.13 – Interação entre tensão e velocidade de soldagem na penetração do cordão de solda do processo MAG.

### 5.2.3 Análise da Largura do Cordão de Solda para o Processo MAG

De acordo com o gráfico da probabilidade normal (figura 5.14) e o diagrama de Pareto (figura 5.15), os fatores significativos para a largura do cordão de solda são a tensão e a velocidade de soldagem. A velocidade de alimentação de arame e as interações entre os fatores não são significativos.

O valor máximo da largura do cordão de solda ocorre quando a velocidade de soldagem está em seu nível mínimo (4,5 mm/s) ou a tensão está em seu nível máximo (32 V).

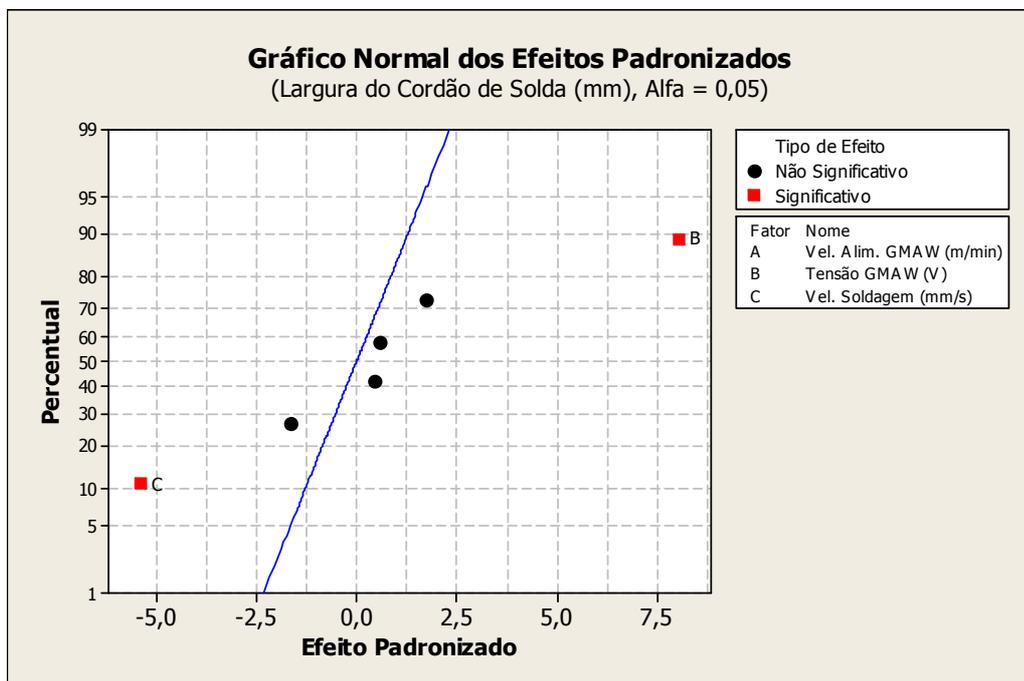


Figura 5.14 – Gráfico da probabilidade normal para a largura do cordão de solda do processo MAG.

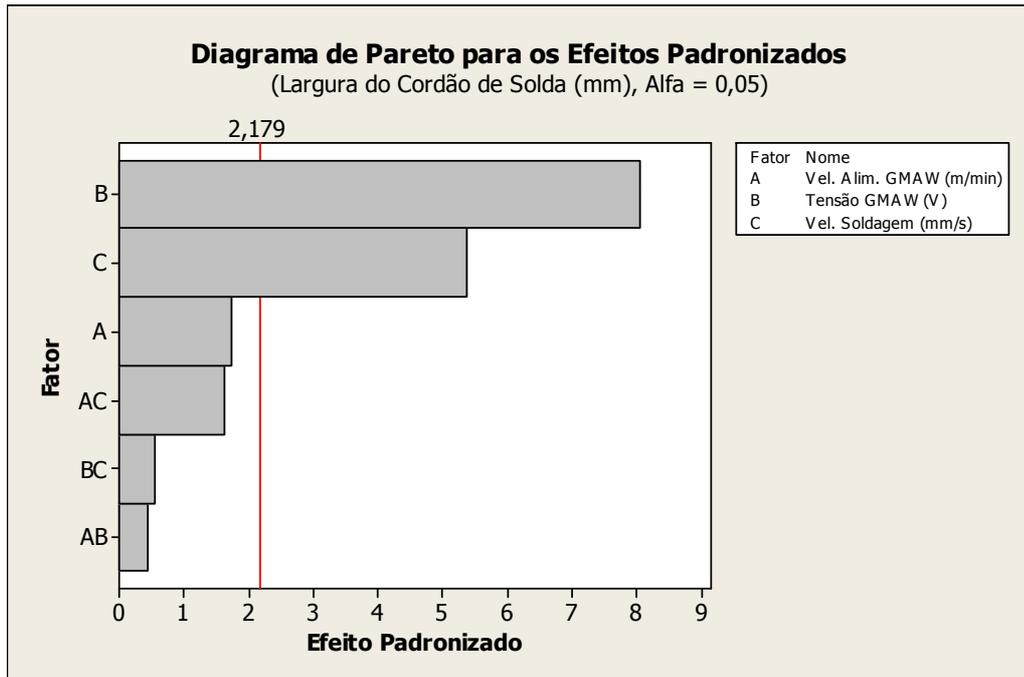


Figura 5.15 – Diagrama de Pareto para a largura do cordão de solda do processo MAG.

#### 5.2.4 Análise do Reforço do Cordão de Solda para o Processo MAG

Conforme indicado no gráfico da probabilidade normal (figura 5.16) e o diagrama de Pareto (figura 5.17), os fatores significativos para a altura do reforço do cordão de solda para o processo MAG são a velocidade de alimentação de arame, a tensão de soldagem e a interação entre tensão e velocidade de alimentação de arame. Os demais parâmetros e suas interações não atingiram o nível de significância. Pela probabilidade normal, a maior altura de reforço é obtida com a velocidade de alimentação de arame em seu nível máximo (7 m/min) ou a tensão de soldagem em seu nível mínimo (26 V).

Verifica-se através da figura 5.18 que a interação entre a velocidade de alimentação de arame e a tensão de soldagem proporciona a maior altura de reforço quando a velocidade de alimentação de arame está em seu nível máximo (7 m/min) e a tensão está em seu nível mínimo (26 V). A menor altura de reforço ocorre quando a velocidade de alimentação de arame e a tensão estão em seu nível intermediário (6,5 m/min e 29 V, respectivamente).

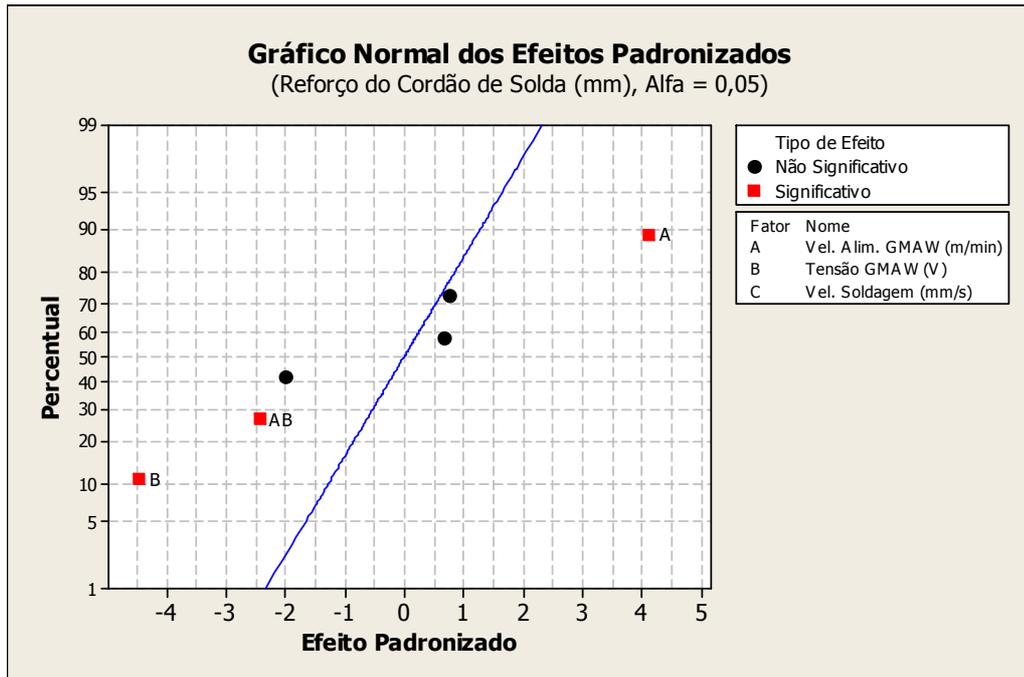


Figura 5.16 – Gráfico da probabilidade normal para o reforço do cordão de solda do processo MAG.

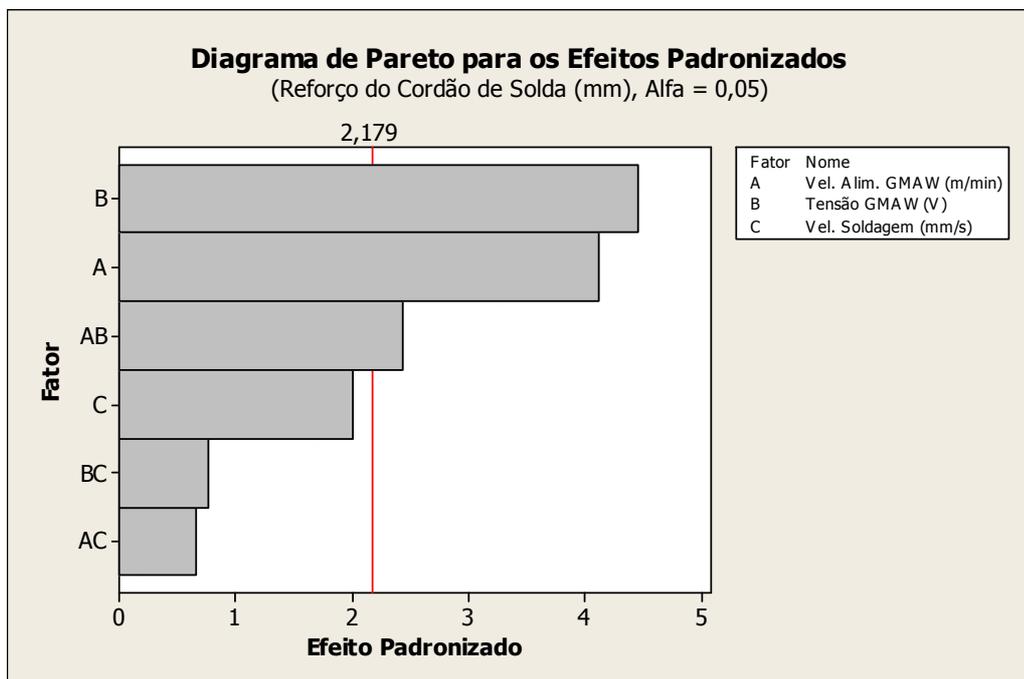


Figura 5.17 – Diagrama de Pareto para o reforço do cordão de solda do processo MAG.

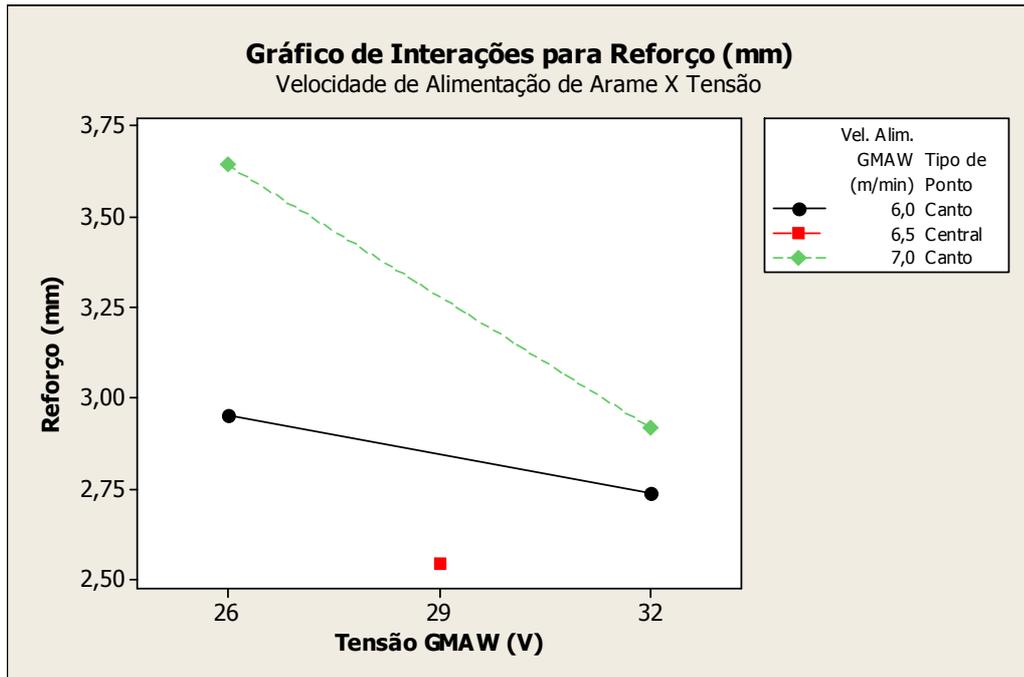


Figura 5.18 – Interação entre velocidade de alimentação de arame e tensão no reforço de cordão de solda do processo MAG.

### 5.3 Soldagem TIG e MAG em Tandem

Definidos os parâmetros de soldagem para o processo TIG e MAG, as soldas foram realizadas nas chapas de aço ao carbono para posterior corte dos excessos de material nas laterais dos cordões de solda, corte das amostras, polimento e ataque químico com reagente Nital 10%.

O aspecto visual dos cordões de solda (conforme o anexo II) mostra que se obtiveram cordões de solda com qualidade satisfatória. A presença de salpicos ocorreu em praticamente todos os cordões de solda, assim como no processo MAG convencional. Pelo fato das correntes utilizadas ficarem abaixo de 200 A, a transferência metálica foi do tipo curto-circuito, caracterizada pela grande quantidade de salpicos.

O planejamento do projeto de experimentos fatorial fracionado é descrito nas tabelas 5.3 e 5.4, onde estão expostos os fatores, resultados, experimentos e ordem aleatória em que estes foram executados.

Assim como o projeto de experimentos para os processos TIG e MAG convencionais, utilizou-se um planejamento de resolução IV. Também se utilizou o software Minitab para determinar a influência dos fatores na resposta, com um intervalo de confiança de 95%. A

significância de um fator ou interação entre fatores é válida para valores de alfa menores que 5% ( $P < 5\%$ ).

Tabela 5.3 – Planejamento fatorial fracionado do experimento ( $2^{6-2} + 4$ ) para o processo de soldagem TIG e MAG em tandem.

Experimento	Ordem aleatória de execução	Velocidade de alimentação (m/min)	Tensão MAG (V)	Corrente TIG (A)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Distância eletrodo a peça (mm)	Distância entre tochas (mm)
8	1	7,0	26	150	5,5	3,0	50
6	2	6,0	26	150	4,5	2,0	30
7	3	7,0	32	250	4,5	3,0	30
10	4	6,5	29	200	5,0	2,5	40
9	5	6,0	32	250	5,5	2,0	50
14	6	7,0	26	250	5,5	2,0	30
11	7	7,0	32	150	4,5	2,0	50
12	8	6,0	26	250	4,5	3,0	50
13	9	6,0	32	150	5,5	3,0	30
15	10	6,5	29	200	5,0	2,5	40
20	11	6,5	29	200	5,0	2,5	40
16	12	7,0	26	150	4,5	3,0	30
17	13	6,0	32	250	4,5	2,0	30
19	14	7,0	32	250	5,5	3,0	50
18	15	6,0	26	150	5,5	2,0	50
4	16	6,0	26	250	5,5	3,0	30
3	17	7,0	32	150	5,5	2,0	30
2	18	7,0	26	250	4,5	2,0	50
1	19	6,0	32	150	4,5	3,0	50
5	20	6,5	29	200	5,0	2,5	40

Tabela 5.4 – Resultados do planejamento fatorial fracionado do experimento ( $2^{6-2} + 4$ ) para o processo de soldagem TIG e MAG em tandem.

Experimento	Ordem aleatória de execução	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
8	1	36,77	3,36	9,82	3,36
6	2	39,86	3,16	11,49	2,96
7	3	60,32	3,84	16,66	2,74
10	4	48,97	3,50	13,80	2,74
9	5	43,04	3,16	13,01	2,44
14	6	40,04	3,43	9,40	3,28
11	7	58,41	3,47	16,03	2,77
12	8	44,38	3,45	12,02	2,89
13	9	41,87	3,06	12,24	2,54
15	10	36,66	3,51	11,22	2,18
20	11	38,89	3,30	12,15	2,37
16	12	47,73	4,12	11,27	3,58
17	13	51,01	3,08	15,84	2,15
19	14	47,91	3,19	14,20	2,66
18	15	30,24	2,85	8,81	3,08
4	16	37,56	3,28	10,67	2,91
3	17	45,30	3,59	12,25	2,74
2	18	62,04	4,23	14,39	3,39
1	19	47,27	2,71	15,19	2,54
5	20	44,52	3,62	12,62	2,71

### 5.3.1 Análise da Área do Cordão de Solda para o Processo TIG e MAG em Tandem

De acordo com o gráfico de probabilidade normal (figura 5.19) e o diagrama de Pareto (figura 5.20), os fatores significativos para a área do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem são a velocidade de alimentação de arame, a tensão MAG e a velocidade de soldagem. Pelo gráfico de probabilidade normal, para maximizar o valor da área, a área do cordão de solda atinge seu valor máximo quando a velocidade de alimentação de arame ou a tensão MAG estiverem nos seus níveis máximos (7 m/min e 32 V, respectivamente) ou a velocidade de soldagem estiver em seu nível mínimo (4,5 mm/s).

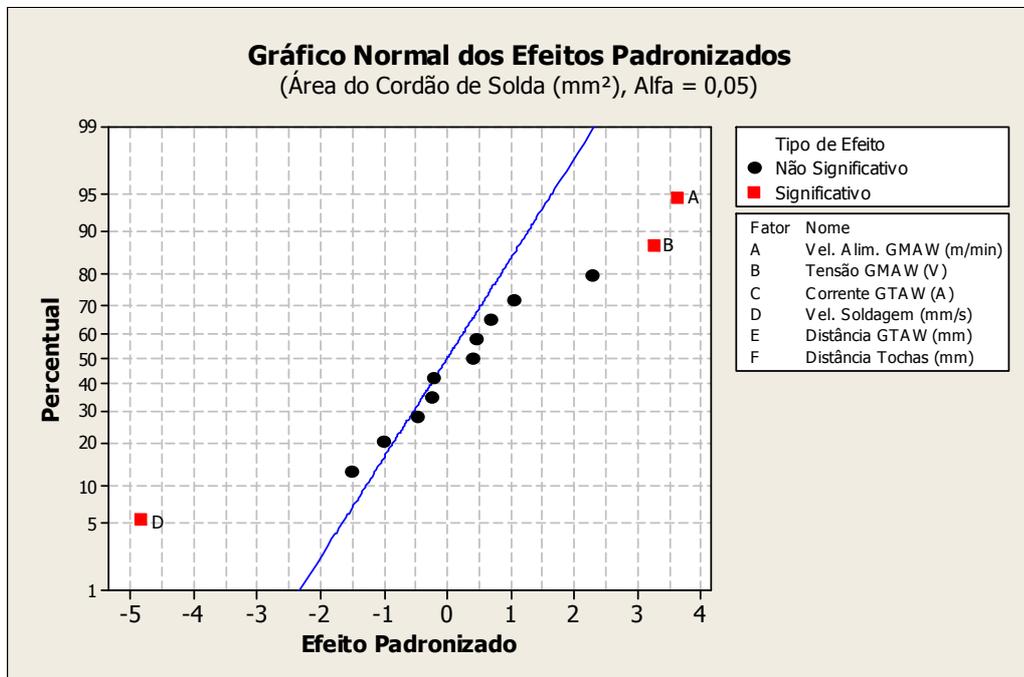


Figura 5.19 – Gráfico da probabilidade normal para a área do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

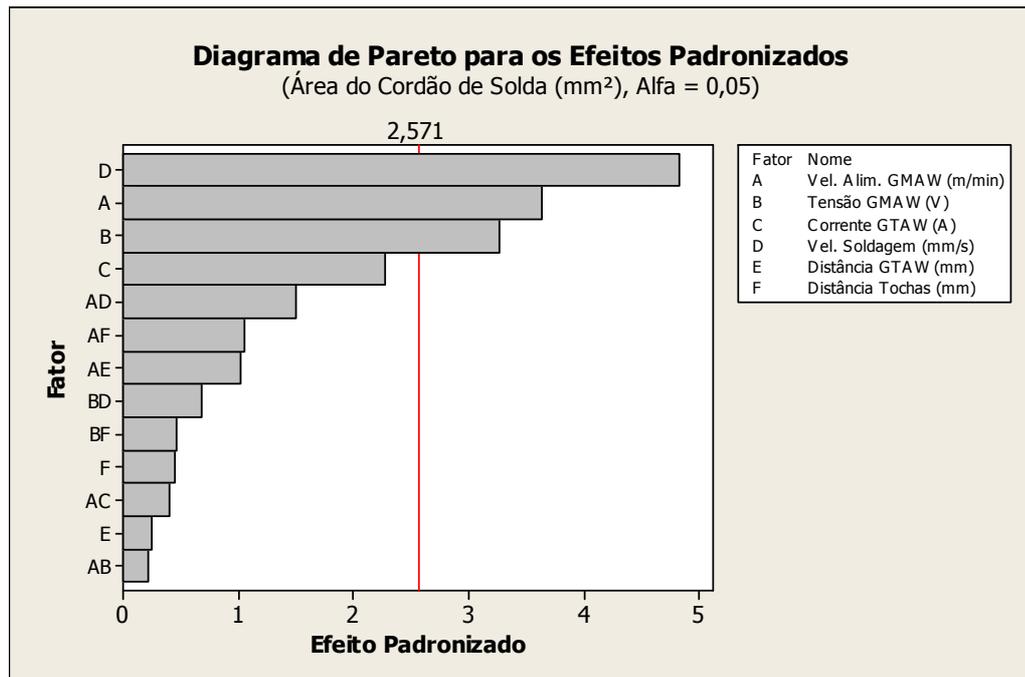


Figura 5.20 – Diagrama de Pareto para a área do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

### 5.3.2 Análise da Penetração do Cordão de Solda para o Processo TIG e MAG em Tandem

Pelo gráfico de probabilidade normal (figura 5.21) e o diagrama de Pareto (figura 5.22), os fatores significativos para a penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem são a velocidade de alimentação de arame, a tensão MAG, a corrente TIG, a velocidade de soldagem, a interação entre a velocidade de alimentação de arame e a velocidade de soldagem e a interação entre a tensão MAG e a velocidade de soldagem.

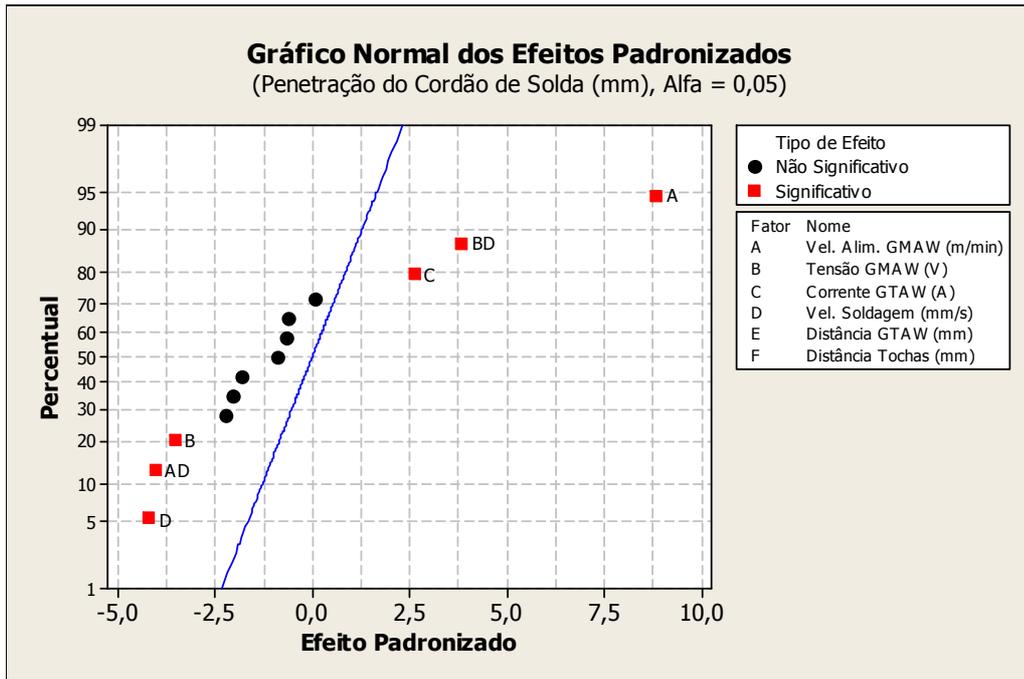


Figura 5.21 – Gráfico da probabilidade normal para a penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

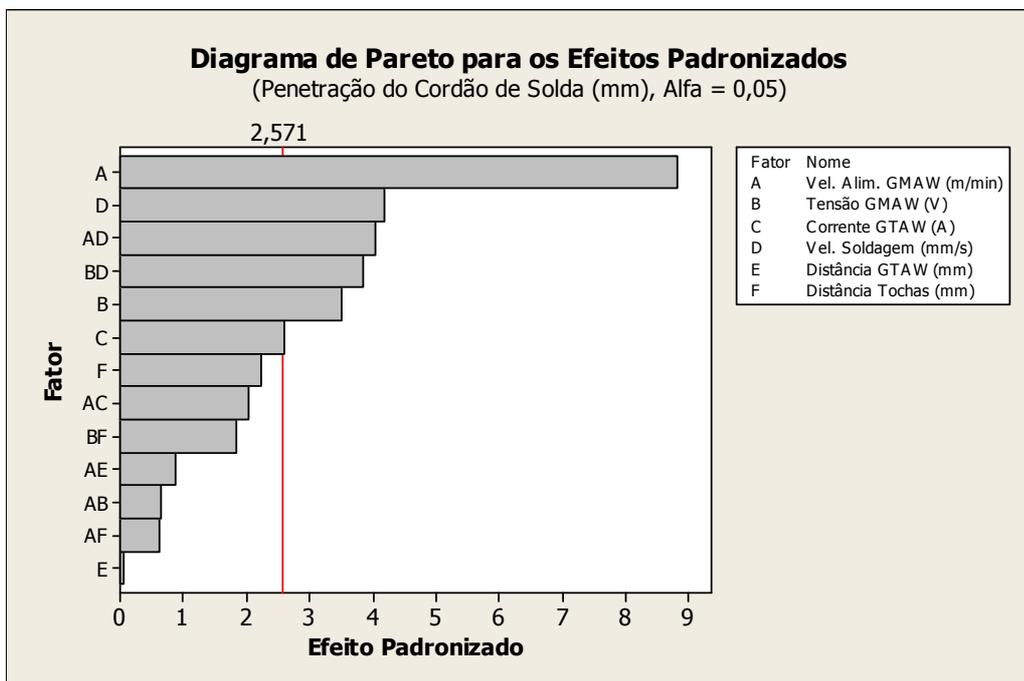


Figura 5.22 – Diagrama de Pareto da penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

Pela figura 5.23, verifica-se que a maior penetração para o processo TIG e MAG em tandem ocorre quando a interação da velocidade de alimentação de arame está em seu nível máximo (7 m/min) e a velocidade de soldagem no seu nível mínimo (4,5 mm/s). Para essa mesma interação, a menor penetração ocorre quando a velocidade de alimentação de arame está em seu nível mínimo (6 m/min) e a velocidade de soldagem em seu nível máximo (5,5 mm/s).

Na figura 5.24, nota-se que a maior penetração para o processo TIG e MAG em tandem ocorre também pela interação da tensão MAG e a velocidade de soldagem em seus níveis mínimos (26 V e 4,5 mm/s, respectivamente). Nesse caso, para chegar a menor penetração, adota-se a tensão MAG em seu nível mínimo (26 V) e a velocidade de soldagem em seu nível máximo (5,5 mm/s).

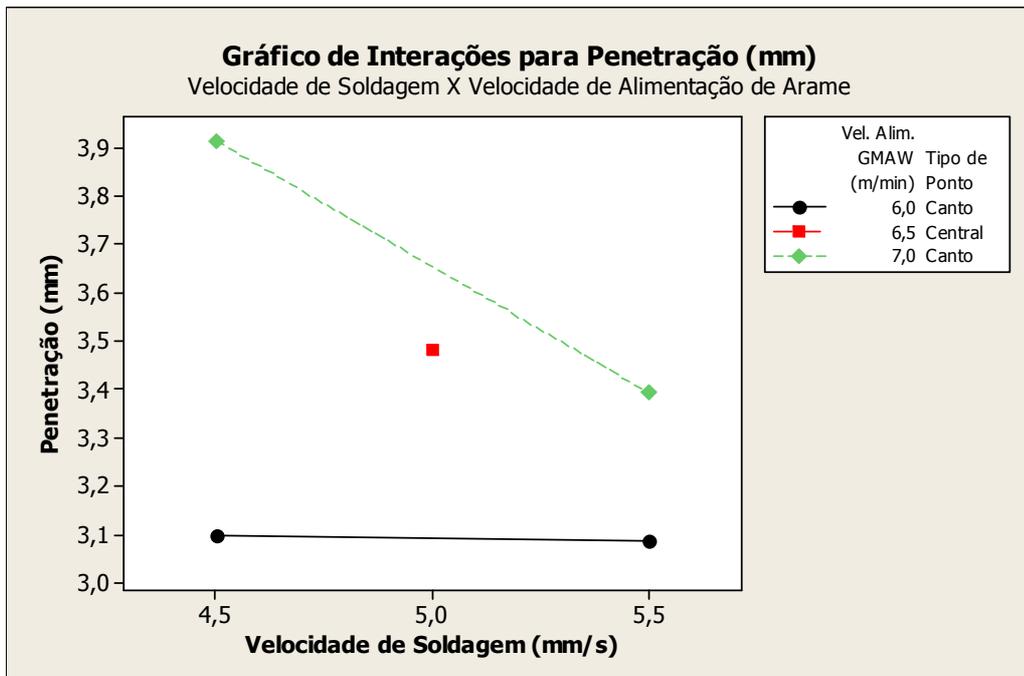


Figura 5.23 – Interação entre velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem na penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

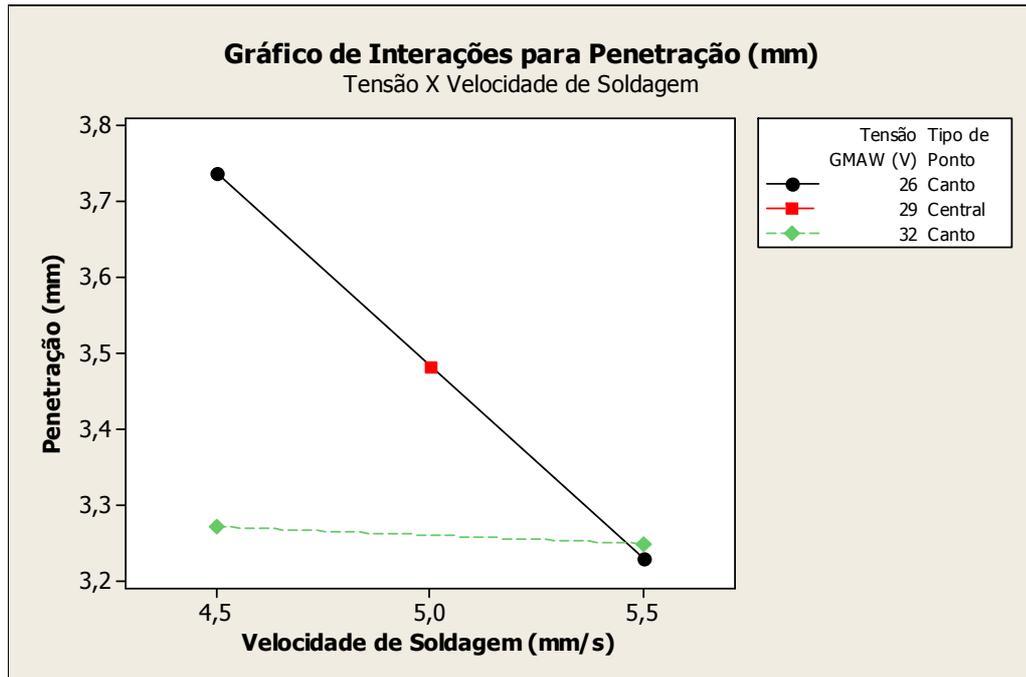


Figura 5.24 – Interação entre tensão e velocidade de soldagem na penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

### 5.3.3 Análise da Largura do Cordão de Solda para o Processo TIG e MAG em Tandem

Pelo gráfico da probabilidade normal (figura 5.25) e o diagrama de Pareto (figura 5.26), os fatores significativos para a largura do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem são a tensão MAG e a velocidade de soldagem. Os demais fatores e suas interações não exercem efeitos significativos.

Analisando o gráfico da probabilidade normal, a máxima largura ocorre quando a tensão está em seu nível máximo (32 V) ou a velocidade de soldagem está em seu nível mínimo (4,5 mm/s).

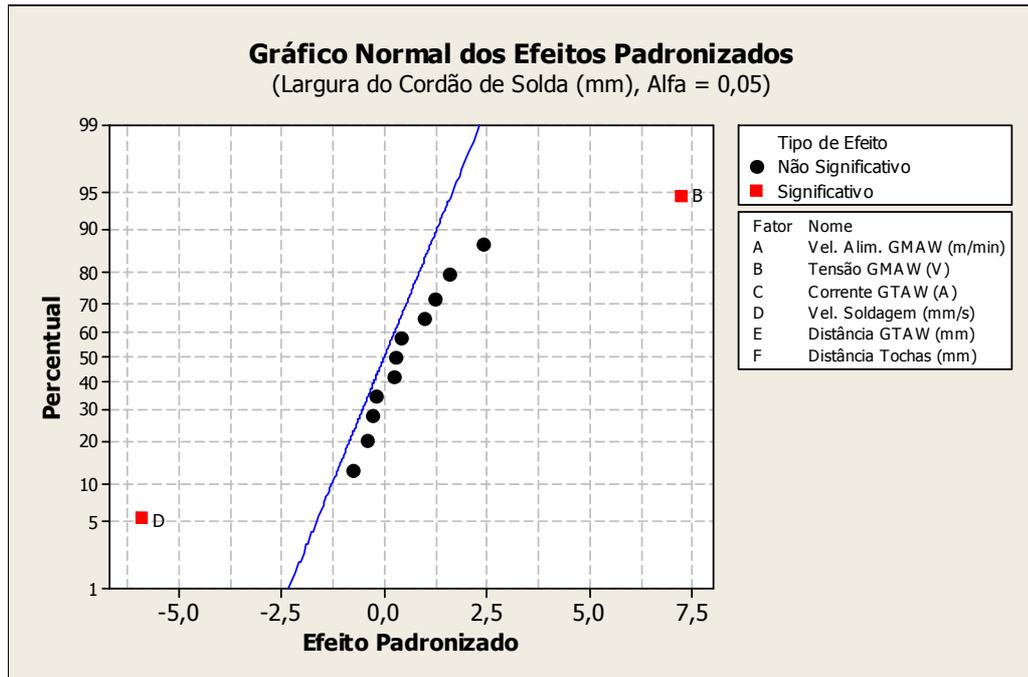


Figura 5.25 – Gráfico da probabilidade normal para a largura do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

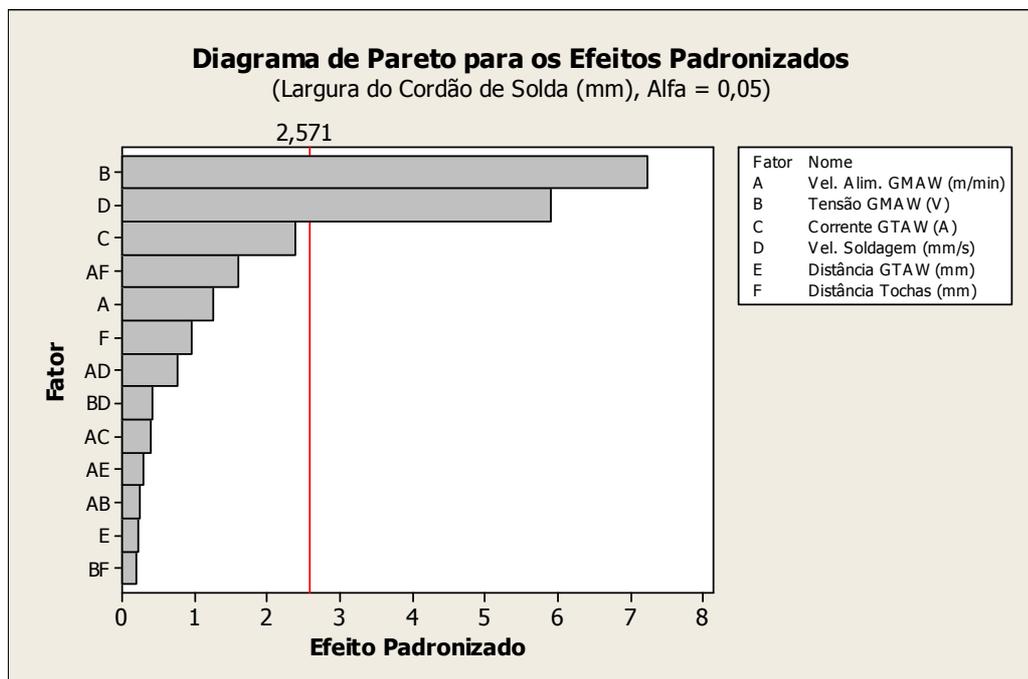


Figura 5.26 – Diagrama de Pareto para a largura do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

### 5.3.4 Análise do Reforço do Cordão de Solda para o Processo TIG e MAG em Tandem

Pelo gráfico de probabilidade normal (figura 5.27) e o diagrama de Pareto (figura 5.28), o único fator significativo para a altura do reforço do cordão de solda para o processo TIG e MAG em tandem é a tensão MAG.

Através do gráfico de probabilidade normal, verifica-se que a maior altura de reforço de cordão de solda possível ocorre quando a tensão MAG está em seu nível mínimo (26 V).

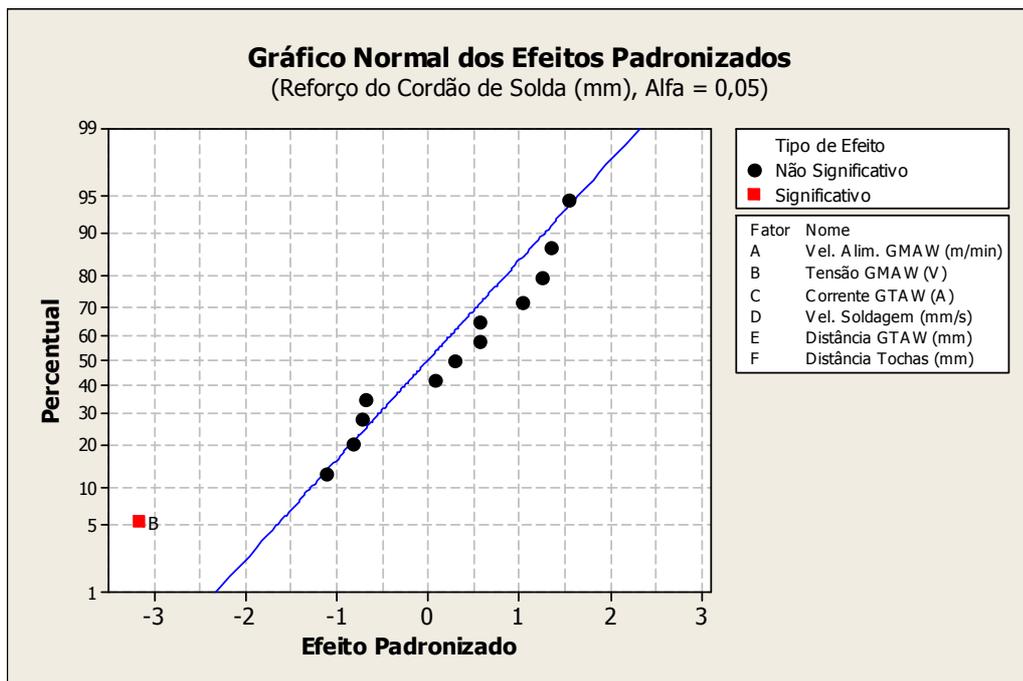


Figura 5.27 – Gráfico da probabilidade normal para a altura do reforço do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

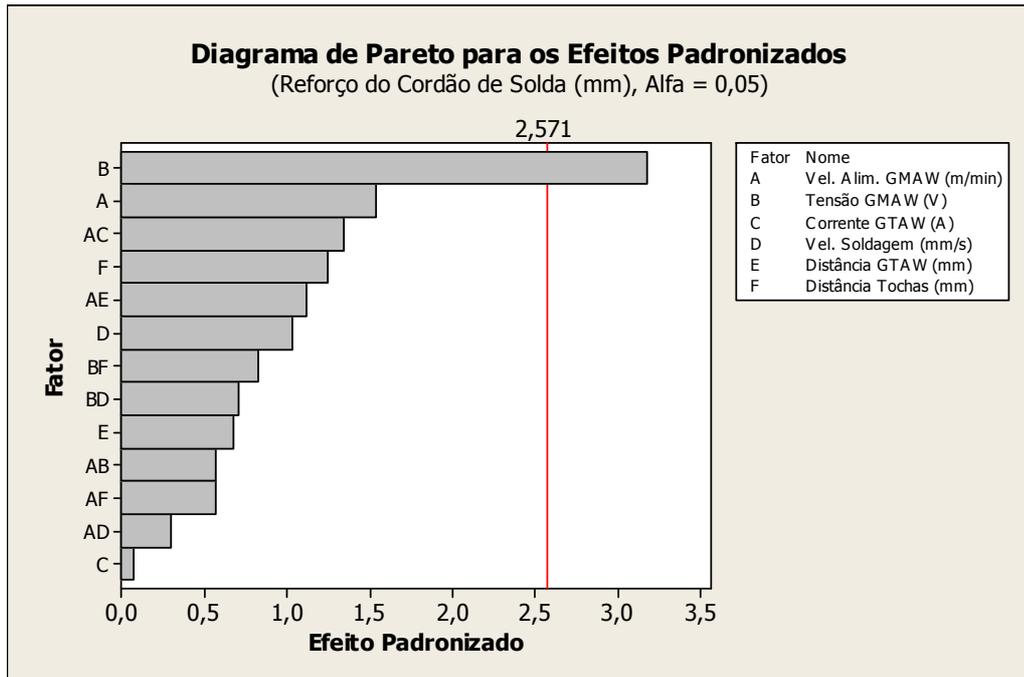


Figura 5.28 – Diagrama de Pareto para a altura do reforço do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

## 5.4 Comparação entre os Processos de Soldagem

Após a análise dos resultados para cada processo de soldagem individualmente, é necessária a comparação dos resultados entre os processos, a fim de determinar qual a melhor aplicação para chegar a um resultado desejado.

Para isso, o uso da análise de variância teve papel importante na escolha do processo de soldagem mais adequado para otimizar o resultado da geometria do cordão de solda.

### 5.4.1 Comparação entre os Processos de Soldagem – Área do Cordão de Solda

Na figura 5.29, observa-se o gráfico dos valores individuais da área do cordão de solda para cada processo. No caso, 1 para o processo TIG e MAG em tandem, 2 para o processo TIG convencional, e 3 para o processo MAG convencional.

A tabela 5.5 apresenta as médias e desvios padrão das áreas para cada processo de soldagem e a figura 5.30 mostra o gráfico tipo *box* com as áreas dos cordões de solda para cada processo.

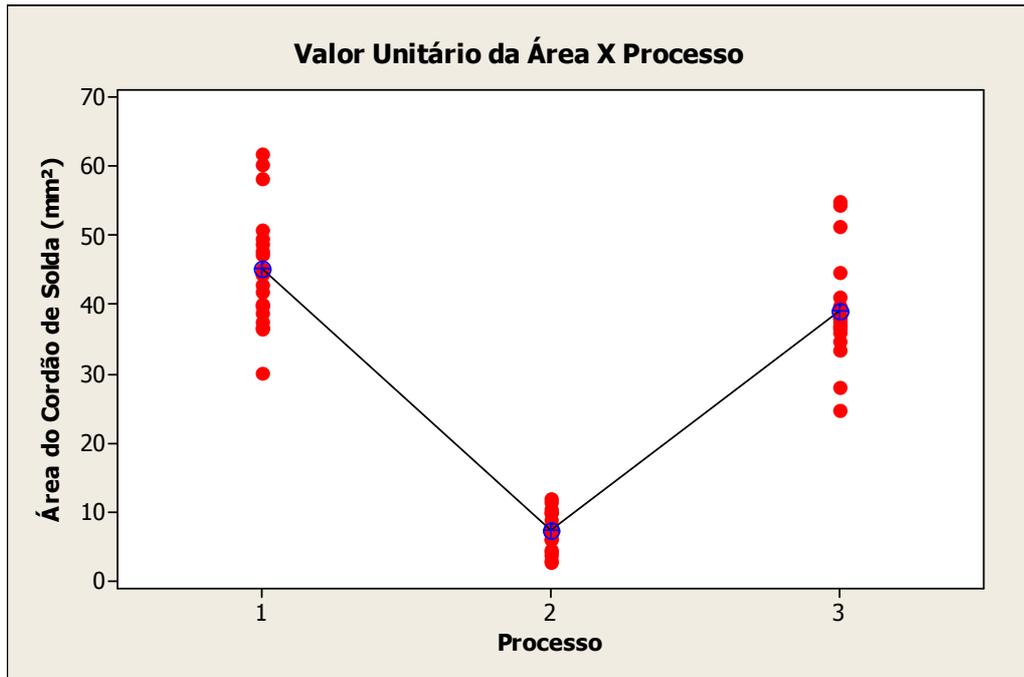


Figura 5.29 – Gráfico de valores individuais da área do cordão de solda para cada processo de soldagem.

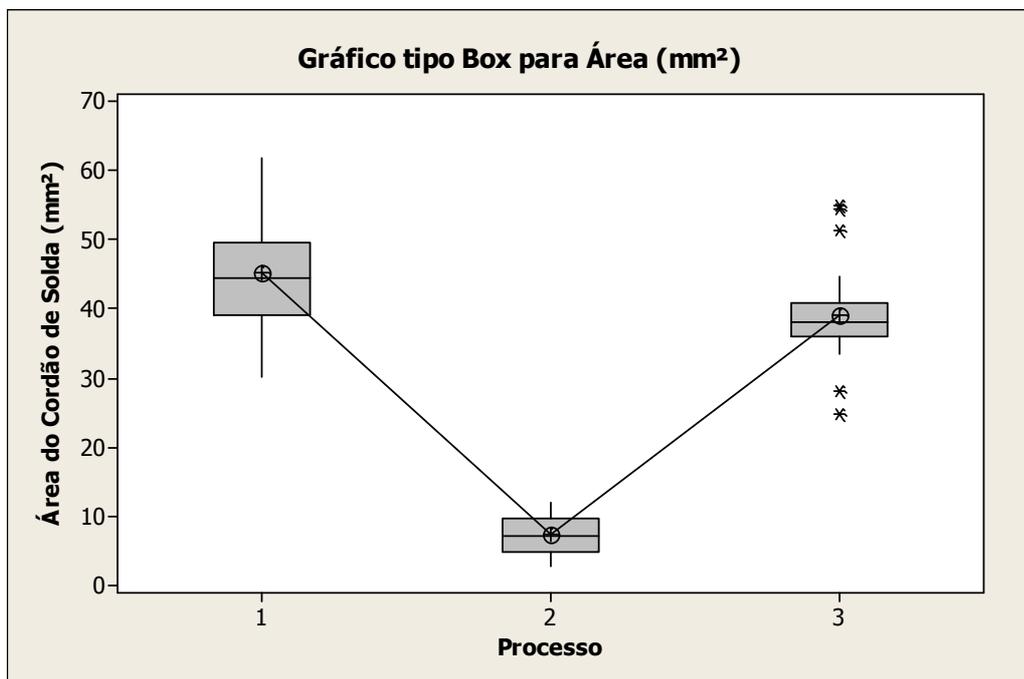


Figura 5.30 – Gráfico tipo *box* com a área do cordão de solda para cada processo de soldagem.

Tabela 5.5 – Médias e desvios padrão das áreas para cada processo de soldagem.

Processo de soldagem	Valor médio da área do cordão de solda (mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão da área do cordão de solda (mm <sup>2</sup> )
TIG e MAG em tandem	45,23	8,28
TIG convencional	7,16	2,68
MAG convencional	39,22	7,58

Os valores máximos para área do cordão de solda atingem-se utilizando o processo TIG e MAG em tandem. Entretanto, pelos valores do desvio padrão, as faixas de valores dos processos TIG e MAG em tandem e MAG convencional se sobrepõem, considerando as menores áreas obtidas do processo TIG e MAG em tandem e as maiores áreas obtidas do processo MAG.

#### 5.4.2 Comparação entre os Processos de Soldagem – Penetração do Cordão de Solda

Na figura 5.31, observa-se o gráfico dos valores individuais da penetração do cordão de solda para cada processo. No caso, 1 para o processo TIG e MAG em tandem, 2 para o processo TIG convencional, e 3 para o processo MAG convencional.

A tabela 5.6 apresenta as médias das penetrações para cada processo de soldagem e a figura 5.32 mostra o gráfico tipo *box* com as penetrações dos cordões de solda para cada processo.

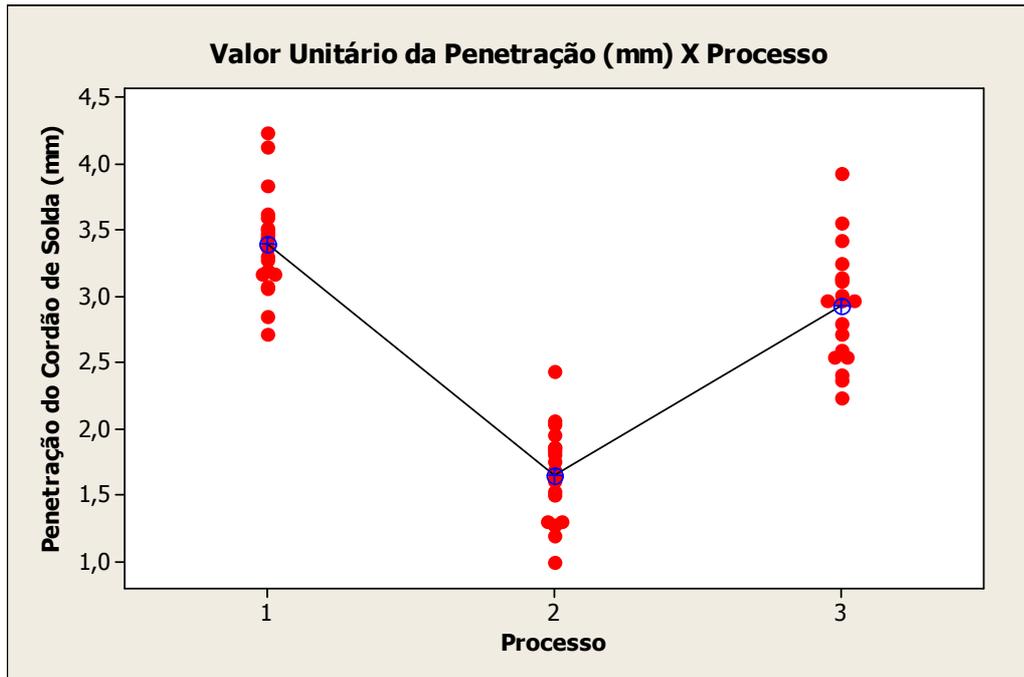


Figura 5.31 – Gráfico de valores individuais da penetração do cordão de solda para cada processo de soldagem.

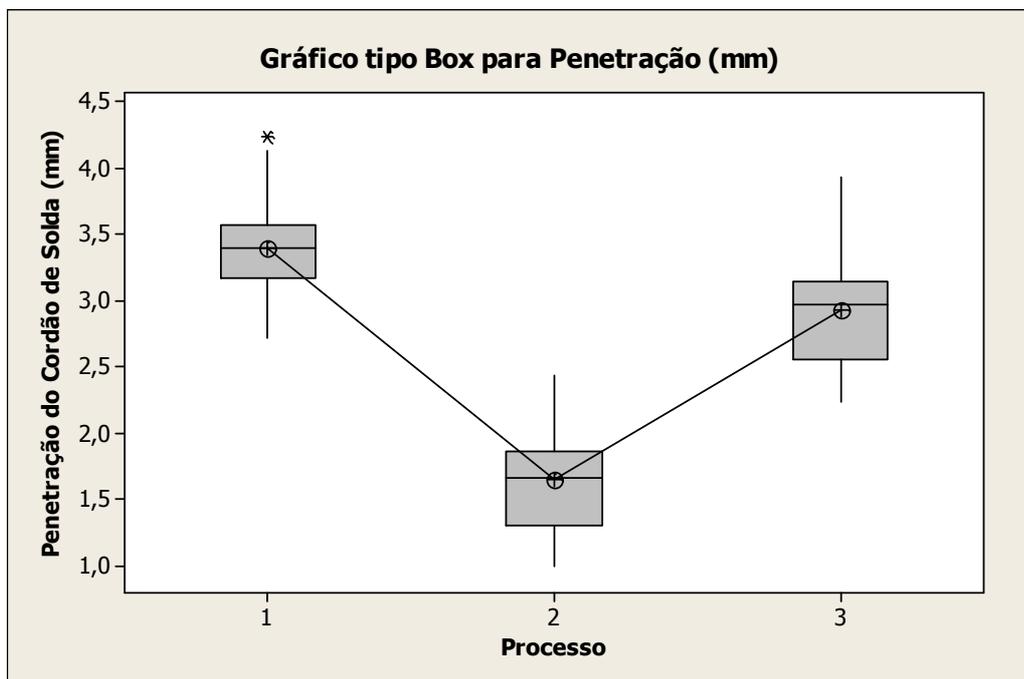


Figura 5.32 – Gráfico tipo *box* com a penetração do cordão de solda para cada processo de soldagem.

Tabela 5.6 – Médias e desvios padrão das penetrações para cada processo de soldagem.

Processo de soldagem	Valor médio da penetração do cordão de solda (mm)	Desvio padrão da penetração do cordão de solda (mm)
TIG e MAG em tandem	3,39	0,38
TIG convencional	1,64	0,36
MAG convencional	2,93	0,42

Os valores máximos para penetração do cordão de solda atingem-se utilizando o processo TIG e MAG em tandem. Entretanto, pelos valores do desvio padrão, as faixas de valores dos processos TIG e MAG em tandem e MAG convencional se sobrepõem, considerando as menores penetrações obtidas do processo TIG e MAG em tandem e as maiores penetrações obtidas do processo MAG.

#### 5.4.3 Comparação entre os Processos de Soldagem – Largura do Cordão de Solda

Na figura 5.33, observa-se o gráfico dos valores individuais da largura do cordão de solda para cada processo. No caso, 1 para o processo TIG e MAG em tandem, 2 para o processo TIG convencional, e 3 para o processo MAG convencional.

A tabela 5.7 apresenta as médias das larguras para cada processo de soldagem e a figura 5.34 mostra o gráfico tipo *box* com as larguras dos cordões de solda para cada processo.

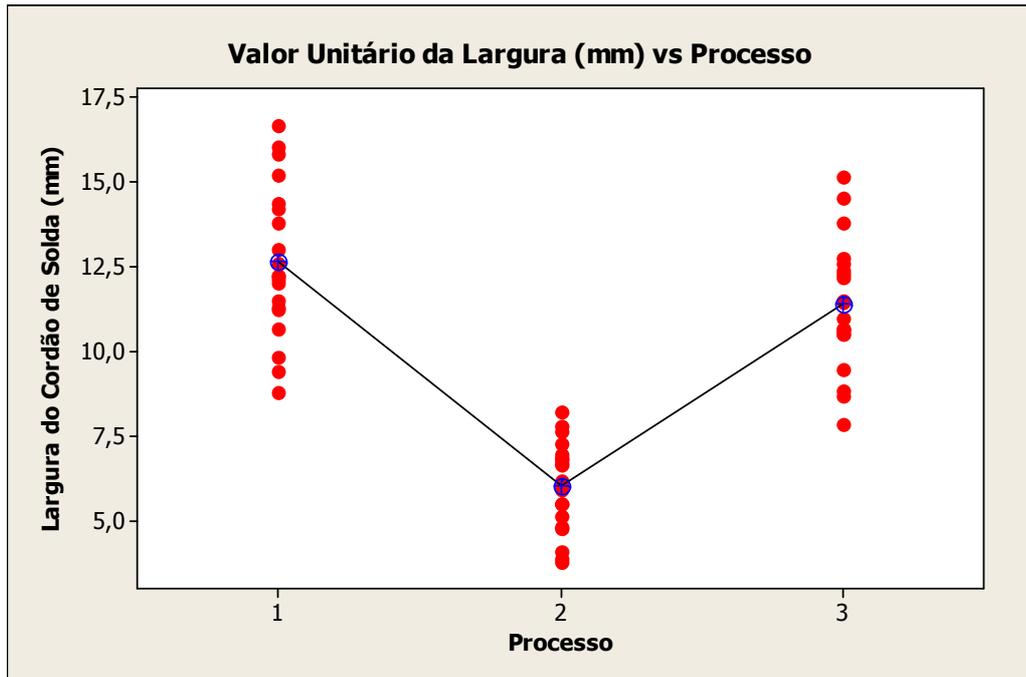


Figura 5.33 – Gráfico de valores individuais da largura do cordão de solda para cada processo de soldagem.

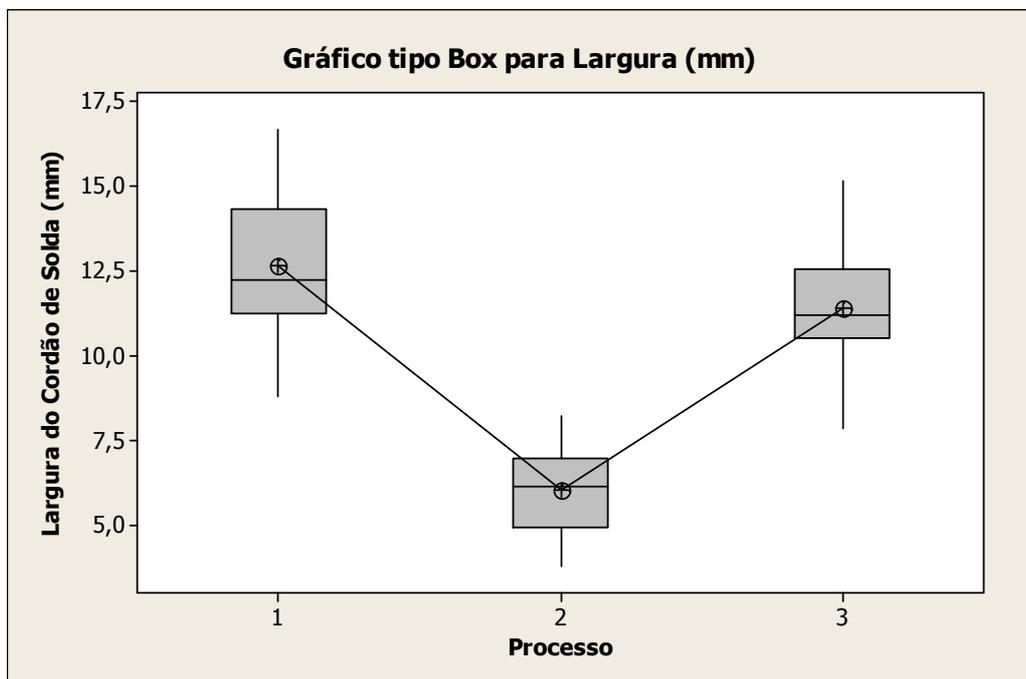


Figura 5.34 – Gráfico tipo *box* com a largura do cordão de solda para cada processo de soldagem.

Tabela 5.7 – Médias e desvios padrão das larguras para cada processo de soldagem.

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

Os valores máximos para largura do cordão de solda atingem-se utilizando o processo TIG e MAG em tandem. Como na situação anterior, pelos valores do desvio padrão, as faixas de valores dos processos TIG e MAG em tandem e MAG convencional se sobrepõem, considerando as menores larguras obtidas do processo TIG e MAG em tandem e as maiores larguras obtidas do processo MAG.

#### 5.4.4 Comparação entre os Processos de Soldagem – Reforço do Cordão de Solda

Na figura 5.35, observa-se o gráfico dos valores individuais da altura do reforço do cordão de solda para cada processo. No caso, 1 para o processo TIG e MAG em tandem, 2 para o processo TIG convencional, e 3 para o processo MAG convencional.

A figura 5.36 mostra o gráfico tipo *box* com as altura do reforço dos cordões de solda para cada processo e a tabela 5.8 apresenta as médias das alturas do reforço para cada processo de soldagem.



Tabela 5.8 – Médias e desvios padrão das alturas do reforço para cada processo de soldagem.

Processo de soldagem	Valor médio da altura do reforço do cordão de solda (mm)	Desvio padrão da altura do reforço do cordão de solda (mm)
TIG e MAG em tandem	2,74	0,35
TIG convencional	0,00	0,00
MAG convencional	2,96	0,43

Os valores máximos para altura do reforço do cordão de solda atingem-se utilizando o processo MAG convencional. Mais uma vez, pelos valores do desvio padrão, as faixas de valores dos processos TIG e MAG em tandem e MAG convencional se sobrepõem, considerando as menores alturas de reforço obtidas do processo MAG convencional e as maiores alturas de reforço obtidas do processo TIG e MAG em tandem.

## 6 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados adquiridos durante todo o trabalho de pesquisa, retiram-se as seguintes conclusões:

Foram investigados os parâmetros de soldagem para o processo de soldagem mecanizado com tochas TIG e MAG operando simultaneamente configuradas em tandem onde, para os parâmetros de soldagem escolhidos, a geometria do cordão de solda para esse processo apresentou diferenças em relação aos processos de soldagem TIG e MAG operando de forma independente.

O projeto de experimento baseado no método fatorial fracionado se mostrou eficaz na modelagem das respostas dos três processos em função dos parâmetros escolhidos, com resultados confiáveis.

A análise da variância permitiu a comparação dos três processos, e provou que apesar das diferenças entre os resultados, estatisticamente os processos TIG e MAG em tandem e MAG convencional não apresentam diferença sensível, para os valores de parâmetros selecionados, pois seus resultados máximos e mínimos se sobrepõem, de acordo com os valores médios e desvios padrão apresentados.

A sinergia entre os processos de soldagem ficou evidente na significância da corrente de soldagem TIG e da tensão e velocidade de alimentação de arame MAG, além da velocidade de soldagem das tochas, na penetração do cordão de solda do processo TIG e MAG em tandem.

Não houve significância, para os valores estudados, dos parâmetros distância entre tochas de soldagem e distância da ponta do eletrodo não consumível até a peça em nenhum dos resultados.

A realização dos pré-testes na escolha dos parâmetros de soldagem mostrou a sua importância, pois os parâmetros definitivos, responsáveis pelos resultados finais, foram escolhidos com nestes testes preliminares.

Por limitações de espaço na bancada de soldagem mecanizada, o ângulo das tochas de soldagem permaneceu constante em 90°. Uma variação no ângulo da tocha de soldagem MAG refletiria em diferentes geometrias de cordão de solda para os processos MAG convencional e TIG e MAG em tandem.

Na execução dos cordões de solda, não houve repulsão dos arcos elétricos devido ao efeito da deflexão eletromagnética.

Este trabalho colaborou para o estudo dos parâmetros de um processo de soldagem mecanizado TIG e MAG em tandem, em que a literatura sobre tal processo ainda é escassa. No capítulo seguinte, uma diferente aplicação deste processo, além de ideias para trabalhos futuros, é sugerida.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, podem-se ressaltar:

- Otimização dos parâmetros de soldagem, para atingir resultados mais significativos do processo de soldagem TIG e MAG em tandem com relação ao processo de soldagem MAG convencional.
- A continuidade dos estudos para o processo de soldagem TIG e MAG em tandem, através de ensaios de tração, fadiga, tenacidade à fratura, dobramento, análise metalográfica para estudar os efeitos da temperatura através de micrografias, para compreender melhor as particularidades de cada uma das zonas presentes na seção transversal do cordão de solda.
- Execução de cordões de solda para unir chapas chanfradas ou sem chanfro, formando juntas de topo, com consequente análise metalográfica para verificar as propriedades micro e macroestruturais da seção transversal da junta soldada, e execução de ensaios destrutivos e não destrutivos de corpos de prova produzidos pelo processo de soldagem TIG e MAG em tandem.
- Execução de cordões de solda com as tochas de soldagem invertidas, ou seja, a tocha MAG percorrendo o caminho adiante da tocha TIG, empregando os mesmos parâmetros de soldagem aqui estudados, e realizar a comparação dos resultados.
- Estudo de outros parâmetros de soldagem que não foram abordados nesse trabalho e que podem influenciar no resultado final, como a variação do ângulo das tochas de soldagem e vazão de gás de proteção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS A5.18-05 **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. American Welding Society, 2005.

AWS D1.1/D1.1M:2004 **Structural Welding Code – Steel**. American Welding Society, 2004.

Campana, G.; Fortunato, A.; Ascari, A.; Tani, G.; Tomesani, L.; **The influence of arc transfer mode in hybrid laser-mig welding**. Journal of Materials Processing Technology 191, p. 111-113, 2007.

Dykhno, I.; Davis, R. **Joining GMAW and GTAW – Hybrid welding takes on a whole new meaning with new technology developments**. The Fabricator, disponível em [www.thefabricator.com](http://www.thefabricator.com), 2006.

El Rayes, E.; Walz, C.; Sepold, G. **The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry**. Welding Journal 83, no. 5, p. 147-153, 2004.

Essers, W. G.; Willems, G. A. M.; Buelens, J. J. C.; van Gompel, M. R. M. **Plasma-MIG welding – a new torch and arc starting method**. Metal Construction, p. 36-42, 1981.

Ferraresi, V. A.; Resende, A. A. **O Processo de Soldagem Plasma-MIG**. 17º Simpósio do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

Ferraresi, V. A.; Resende, A. A.; Pacheco, M. S. **Avaliação da Influência das Correntes Plasma e MIG sobre a Geometria do Cordão de Solda na Soldagem Plasma-MIG**. VIII Encontro Interno – XII Seminário de Iniciação Científica – Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

Gao, Z.; Wu, Y.; Huang, J. **Analysis of weld pool dynamic during stationary laser-MIG hybrid welding**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 44, p. 870-879, 2009.

Graf, T.; Stauffer, H. **Laser-Hybrid Welding Drives VW Improvements**. Welding Journal 82, no. 1, p. 42-48, 2003.

Haas, A. R. **Análise da influência dos parâmetros de operação sobre a geometria do cordão de solda obtido pelo processo de soldagem por eletrodo tubular**. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

Karadeniz, E.; Ozsarac, U.; Yildiz, C. **The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes**. Materials & Design 28, p. 649-656, 2007.

Kou, S. **Welding metallurgy – second edition**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

Lincoln Electric **GMAW Welding Guide**. The Lincoln Electric Company, 2010.

Liu, L.; Jifeng, W.; Song, G. **Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy**. Materials Science and Engineering A 381, p. 129-133, 2004.

Liu, L.; Song, G.; Liang, G.; Jifeng, W. **Pore formation during hybrid laser-tungsten inert gas arc welding of magnesium alloy AZ31B – mechanism and remedy**. Materials Science and Engineering A 390, p. 76-80, 2005.

Liu, L.; Liu, X.; Liu, S. **Microstructure of laser-TIG hybrid welds of dissimilar Mg alloy and Al alloy with Ce as interlayer**. Scripta Materialia 55, p. 383-386, 2006.

Machado, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

Marques, P. V. **Soldagem: fundamentos e tecnologia / Paulo Villani Marques, Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz – 3ª edição atualizada.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

Messler Jr., R. W. **What's Next for Hybrid Welding?**. Welding Journal 83, no. 3, p. 30-34, 2004.

Montgomery, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade – 4ª edição.** LTC, 2004.

Montgomery, D. C.; Runger, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros – 4ª edição.** LTC, 2009.

Oliveira, M. A. **Desenvolvimentos no processo híbrido plasma-MIG para operações de soldagem e brasagem.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

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

Quites, A. M. **Introdução à soldagem a arco voltaico.** Soldasoft, 2002.

Reutzel, E. W.; Sullivan, M. J.; Mikesic, D. A. **Joining Pipe with the Hybrid Laser-GMAW Process: Weld Test Results and Cost Analysis.** Welding Journal 85, no. 6, p. 66-71, 2006.

Tabam, E.; Kaluc, E.; Dhooge, A. **Hybrid (plasma + gas tungsten arc) weldability of 12% Cr ferritic stainless steel.** Materials & Design 30, p. 4236-4242, 2009.

Wainer, E.; Brandi, S. D. M.; Mello, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia.** 3ª Edição, Edgard Blücher Ltda., 1992.

Yan, J.; Zeng, X.; Gao, M. **Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding.** Optics and Lasers in Engineering, doi:10.1016/j.optlaseng.2009.08.009, 2009.

Yenni, D. M. **High Pressure Arc Processes and Apparatus.** United States Patent Office, Patent N. 2,847,555, 1958.

## ANEXO I

### Parâmetros de Soldagem

No capítulo 4 foram adotados os parâmetros de soldagem definitivos para os três processos de soldagem, conforme as tabelas 4.4 a 4.6. Estes parâmetros foram extraídos com base nas indicações disponíveis na literatura para os processos TIG e MAG convencionais. Estes parâmetros indicados são indicados nas tabelas A.1 a A.11.

Tabela A.1 – Gases de proteção e tipos de corrente usuais na soldagem de aço carbono para o processo TIG [Marques et al., 2009].

Espessura de chapa	Gás de proteção	Tipo de corrente**
Acima de 3,2 mm	Mistura Ar-He* ou He	CCEN

\*Mistura Ar-He com até 75% de He.

\*\*Corrente para soldagem mecanizada.

Tabela A.2 – Valores típicos de corrente para diferentes diâmetros de eletrodo EWTh-2 para o processo TIG [Marques et al., 2009].

Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente (A) em CCEN
1,6	70 – 150
2,4	150 – 250
3,2	250 – 400

Tabela A.3 – Gases de proteção sugeridos para o processo TIG [Machado, 1996].

Material	Gás preferido	Alternativa
Aço baixo carbono	Ar*	He

\*Considerando soldagem manual.

Tabela A.4 – Intervalos de corrente admissíveis para diferentes diâmetros de eletrodo EWTh-2 para o processo TIG [Machado, 1996].

Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente (A) em CCEN
1,6	70 – 150
2,4	150 – 250
3,2	250 – 400

Tabela A.5 – Vazão de gás recomendada em função do material do arame e da corrente para o processo MAG [Machado, 1996].

Material do arame	Vazão para corrente de 100 A (l/min)	Vazão para cada acréscimo de corrente de 50 A (l/min)
Aço	10	1,5

Tabela A.6 – Diâmetro do bocal em função da vazão selecionada para o processo MAG [Machado, 1996].

Vazão (l/min)	Diâmetro (mm)
8 – 11	14
10 – 13	16
12 – 18	18
20 – 25	20

Tabela A.7 – Tipo de gás de proteção em função do material de base para o processo MAG [Machado, 1996].

Material de base	Gás de proteção
Aço ao carbono	Ar

Tabela A.8 – Gases e misturas usados para o processo MAG [Marques et al., 2009].

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
Ar + 3 – 5% O <sub>2</sub>	Oxidante	Aços ao carbono e alguns aços de baixa liga
CO <sub>2</sub>		
Ar + 20-50% CO <sub>2</sub>		Aços
Ar + CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>		

Tabela A.9 – Faixas de corrente utilizáveis com arames de diferentes diâmetros para o processo MAG  
[Marques et al., 2009].

Material	Diâmetro do eletrodo (mm)	Faixa de corrente (A)
	0,8	70 – 180
Aço ao carbono e baixa liga	1,0	90 – 220
	1,2	100 – 270
	1,6	190 – 360

Tabela A.10 – Intervalos típicos de corrente para bitolas usuais de arames para o processo MAG  
[Machado, 1996].

Material	Diâmetro do eletrodo (mm)	Faixa de corrente (A)
Aço ao carbono e baixa liga	0,8	40 – 200
	1,0	60 – 260
	1,2	120 – 360
	1,6	270 – 450

Tabela A.11 – Gases de proteção recomendados para diferentes bitolas de arames ER70S-6 para o processo MAG, de acordo com o fabricante.

Diâmetro do arame	Gás de proteção
0,8	Ar + 15 – 25% CO <sub>2</sub>
1,0	CO <sub>2</sub>
1,2	
1,6	

## APÊNDICE A

### Imagens dos Cordões de Solda e Macrografias

O procedimento de soldagem para realização dos cordões de solda sobre as chapas de aço ao carbono, conforme descrito no capítulo 4.5, resultou em 20 experimentos por processo de soldagem, totalizando 60 cordões de solda para os três processos.

No caso do processo de soldagem TIG e MAG em tandem, utilizou-se uma chapa de 300 x 150 mm para realizar o cordão de solda.

Para os processos TIG convencional e MAG convencional, utilizou-se uma única chapa para realizar o cordão de solda, com metade da extensão da chapa percorrida com apenas a tocha TIG operando e a tocha MAG desligada até atingir a metade da extensão da chapa, quando a tocha TIG era desligada e a tocha MAG iniciava a operação.

Nas imagens das chapas comuns a esses dois processos, os cordões de solda à esquerda foram feitos pelo processo MAG convencional, e os cordões de solda à direita foram realizados pelo processo TIG convencional.

Para os três processos de soldagem, a figura à esquerda corresponde a amostra A, enquanto que a figura à direita corresponde a amostra B.

De cada cordão de solda, retiraram-se duas amostras para a análise metalográfica por macrografia da seção transversal do cordão de solda. As imagens dos cordões de solda e suas respectivas amostras dos experimentos com as maiores médias de valores para área, penetração, largura e reforço do cordão de solda encontram-se nas figuras A.1 a A.25.



Figura A.1 – Cordão de solda do experimento 02 pelo processo TIG e MAG em tandem.

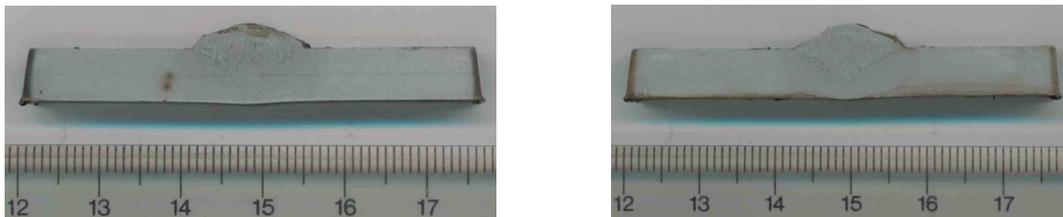


Figura A.2 – Macrografias do experimento 02 com as maiores médias de área e penetração do cordão de solda para o processo TIG e MAG em tandem.



Figura A.3 – Cordões de solda do experimento 02 pelos processos TIG convencional e MAG convencional.

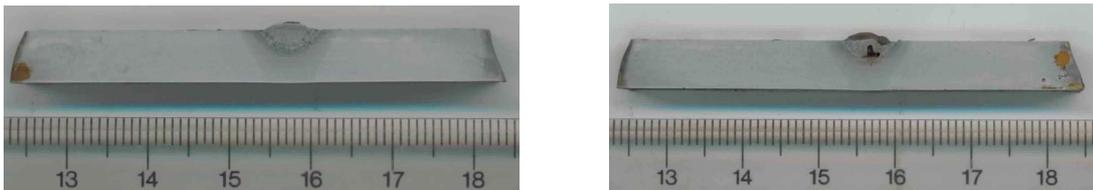


Figura A.4 – Macrografias do experimento 02 com as maiores médias de área e penetração do cordão de solda para o processo TIG.

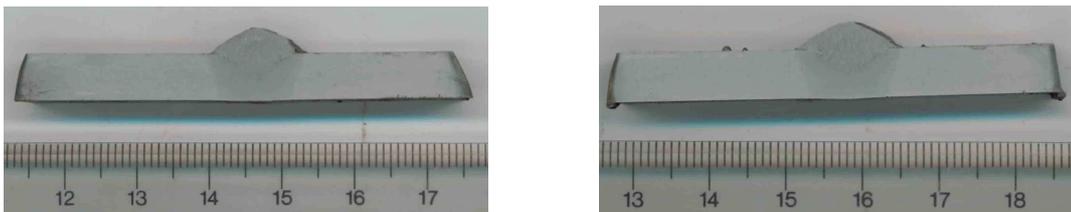


Figura A.5 – Macrografias do experimento 02 com a maior média de penetração do cordão de solda para o processo MAG.



Figura A.6 – Cordão de solda do experimento 04 pelo processo TIG e MAG em tandem.

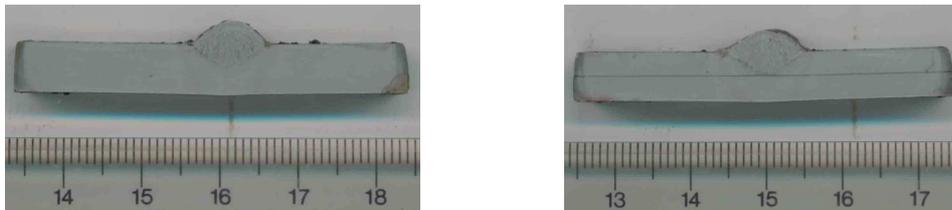


Figura A.7 – Macrografias do cordão de solda do experimento 04 pelo processo TIG e MAG em tandem.



Figura A.8 – Cordões de solda do experimento 04 pelos processos TIG convencional e MAG convencional.

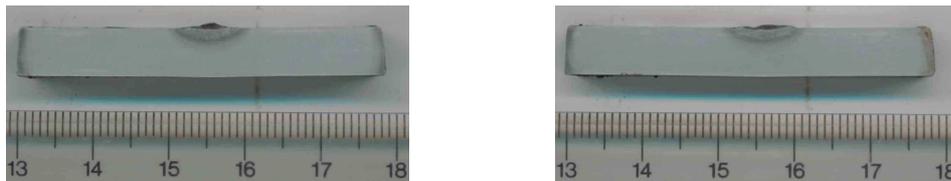


Figura A.9 – Macrografias do experimento 04 com a maior média de largura do cordão de solda para o processo TIG.

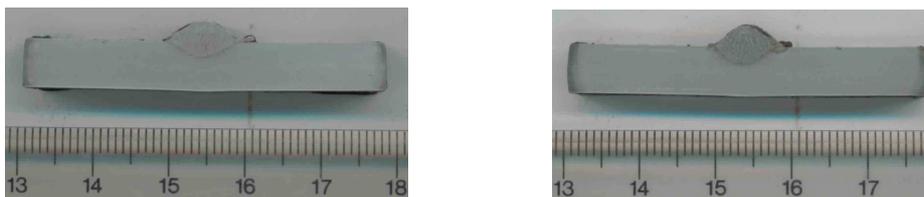


Figura A.10 – Macrografias do cordão de solda do experimento 04 pelo processo MAG.



Figura A.11 – Cordão de solda do experimento 07 pelo processo TIG e MAG em tandem.

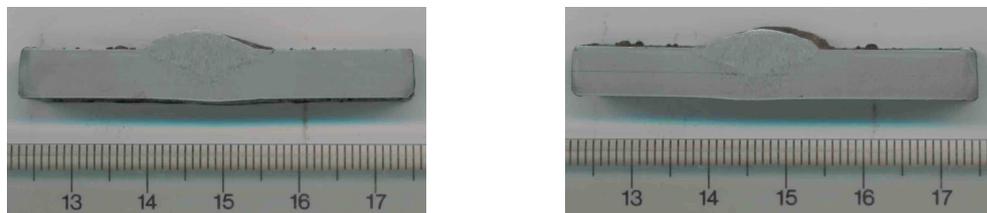


Figura A.12 – Macrografias do experimento 07 com a maior média de largura do cordão de solda para o processo TIG e MAG em tandem.



Figura A.13 – Cordões de solda do experimento 07 pelos processos TIG convencional e MAG convencional.

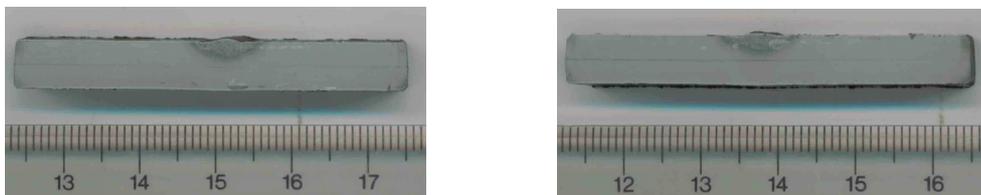


Figura A.14 – Macrografias do cordão de solda do experimento 07 pelo processo TIG.

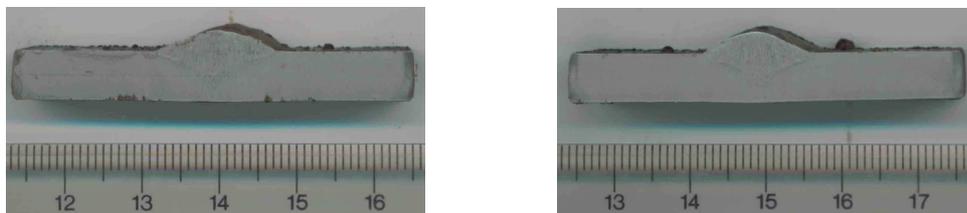


Figura A.15 – Macrografias do experimento 07 com a maior média de largura do cordão de solda para o processo MAG.



Figura A.16 – Cordão de solda do experimento 11 pelo processo TIG e MAG em tandem.

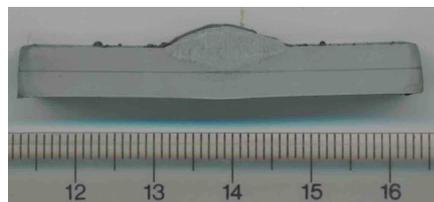
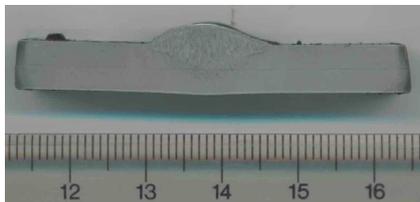


Figura A.17 – Macrografias do cordão de solda do experimento 11 pelo processo TIG e MAG em tandem.



Figura A.18 – Cordões de solda do experimento 11 pelos processos TIG convencional e MAG convencional.

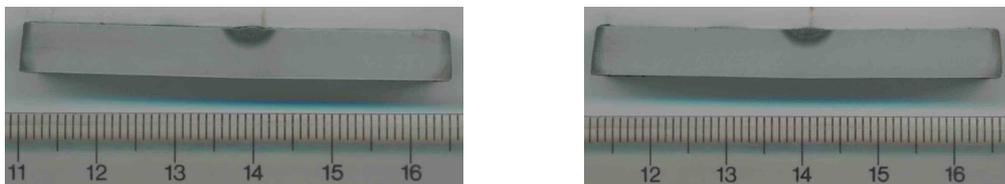


Figura A.19 – Macrografias do cordão de solda do experimento 11 pelo processo TIG.

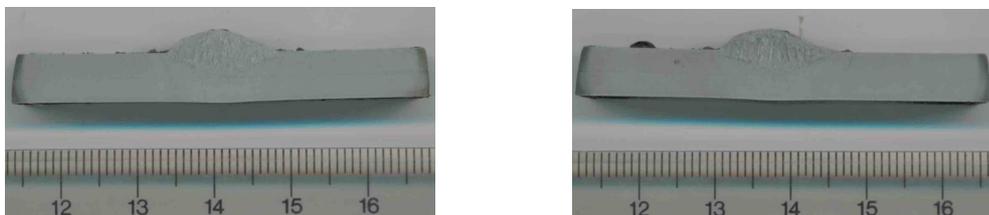


Figura A.20 – Macrografias do experimento 11 com a maior média de área do cordão de solda para o processo MAG.



Figura A.21 – Cordão de solda do experimento 16 pelo processo TIG e MAG em tandem.

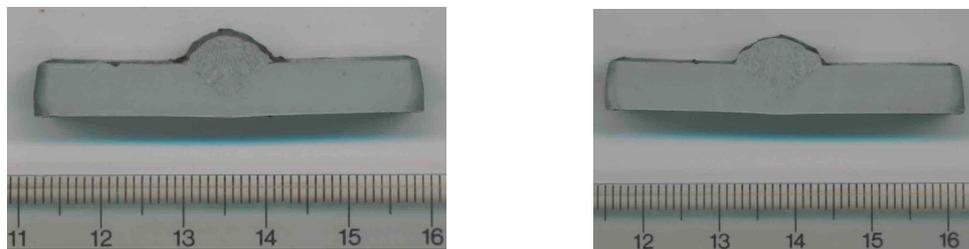


Figura A.22 – Macrografias do experimento 16 com a maior média de altura de reforço do cordão de solda para o processo TIG e MAG em tandem.



Figura A.23 – Cordões de solda do experimento 16 pelos processos TIG convencional e MAG convencional.

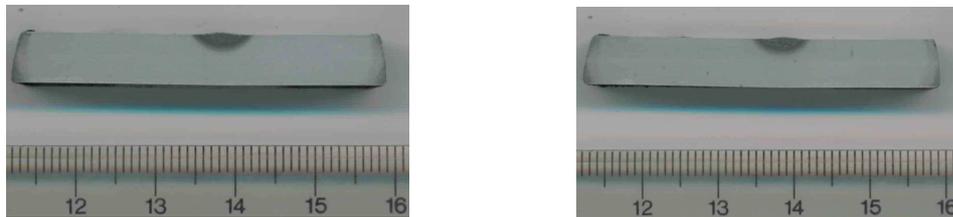


Figura A.24 – Macrografias do cordão de solda do experimento 16 pelo processo TIG.

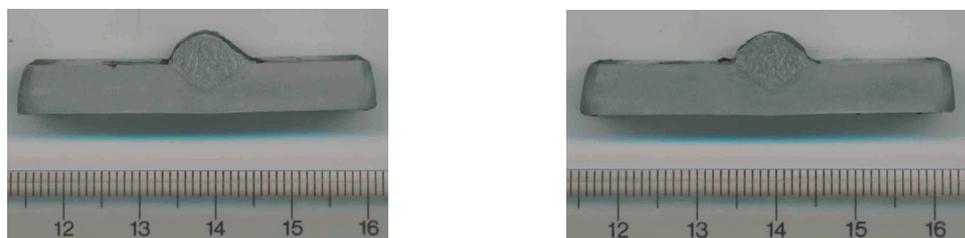


Figura A.25 – Macrografias do experimento 16 com a maior média de altura de reforço do cordão de solda para o processo MAG.

## **APÊNDICE B**

### **Dimensões dos Cordões de Solda**

Conforme o capítulo 4, as amostras retiradas dos cordões de solda de cada processo de soldagem foram digitalizadas em imagem com resolução de 600 dpi. Em seguida, cada uma dessas imagens da seção transversal dos cordões solda passou por uma análise das suas dimensões (área, penetração, largura e altura do reforço) no software ImageJ. Através deste software, foi possível determinar o valor para essas dimensões, sem as quais seria impossível tecer resultados e conclusões.

A seguir se encontram as tabelas B.1 a B.20, com os valores para as dimensões da seção transversal de todas as amostras retiradas dos cordões de solda os três processos de soldagem realizados.

Tabela B.1 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 01.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM01A	47,21	2,71	15,30	2,43
TDM01B	47,33	2,70	15,07	2,65
<b>TDM01 (Média)</b>	<b>47,27</b>	<b>2,71</b>	<b>15,19</b>	<b>2,54</b>
TIG01A	5,42	1,69	5,65	0,00
TIG01B	6,33	2,03	6,77	0,00
<b>TIG01 (Média)</b>	<b>5,88</b>	<b>1,86</b>	<b>6,21</b>	<b>0,00</b>
MAG01A	41,54	2,43	13,55	2,71
MAG01B	40,91	2,37	14,06	3,05
<b>MAG01 (Média)</b>	<b>41,23</b>	<b>2,40</b>	<b>13,81</b>	<b>2,88</b>

Tabela B.2 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 02.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM02A	58,84	4,06	13,88	3,33
TDM02B	65,24	4,40	14,90	3,44
<b>TDM02 (Média)</b>	<b>62,04</b>	<b>4,23</b>	<b>14,39</b>	<b>3,39</b>
TIG02A	13,64	2,31	6,88	0,00
TIG02B	10,41	2,54	7,06	0,00
<b>TIG02 (Média)</b>	<b>12,03</b>	<b>2,43</b>	<b>6,97</b>	<b>0,00</b>
MAG02A	47,98	3,89	11,51	3,56
MAG02B	54,68	3,95	13,10	3,67
<b>MAG02 (Média)</b>	<b>51,33</b>	<b>3,92</b>	<b>12,31</b>	<b>3,62</b>

Tabela B.3 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 03.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM03A	43,16	3,56	11,68	2,65
TDM03B	47,43	3,61	12,81	2,82
<b>TDM03 (Média)</b>	<b>45,30</b>	<b>3,59</b>	<b>12,25</b>	<b>2,74</b>
TIG03A	6,12	2,03	6,15	0,00
TIG03B	7,49	2,03	5,93	0,00
<b>TIG03 (Média)</b>	<b>6,81</b>	<b>2,03</b>	<b>6,04</b>	<b>0,00</b>
MAG03A	41,06	3,61	11,46	3,16
MAG03B	38,80	2,60	11,57	3,16
<b>MAG03 (Média)</b>	<b>39,93</b>	<b>3,11</b>	<b>11,52</b>	<b>3,16</b>

Tabela B.4 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 04.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM04A	36,57	3,16	9,71	2,93
TDM04B	38,55	3,39	11,63	2,88
<b>TDM04 (Média)</b>	<b>37,56</b>	<b>3,28</b>	<b>10,67</b>	<b>2,91</b>
TIG04A	7,41	1,47	8,18	0,00
TIG04B	8,25	1,75	8,30	0,00
<b>TIG04 (Média)</b>	<b>7,83</b>	<b>1,61</b>	<b>8,24</b>	<b>0,00</b>
MAG04A	29,42	2,43	9,94	2,88
MAG04B	26,80	2,65	9,03	2,77
<b>MAG04 (Média)</b>	<b>28,11</b>	<b>2,54</b>	<b>9,49</b>	<b>2,83</b>

Tabela B.5 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 05.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM05A	46,77	3,67	12,47	2,65
TDM05B	42,26	3,56	12,77	2,77
<b>TDM05 (Média)</b>	<b>44,52</b>	<b>3,62</b>	<b>12,62</b>	<b>2,71</b>
TIG05A	6,87	1,80	5,14	0,00
TIG05B	7,57	1,47	5,87	0,00
<b>TIG05 (Média)</b>	<b>7,22</b>	<b>1,64</b>	<b>5,51</b>	<b>0,00</b>
MAG05A	38,14	3,22	10,33	2,82
MAG05B	33,95	2,71	10,67	2,54
<b>MAG05 (Média)</b>	<b>36,05</b>	<b>2,97</b>	<b>10,50</b>	<b>2,68</b>

Tabela B.6 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 06.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM06A	41,04	3,50	12,02	2,82
TDM06B	38,68	2,82	10,95	3,10
<b>TDM06 (Média)</b>	<b>39,86</b>	<b>3,16</b>	<b>11,49</b>	<b>2,96</b>
TIG06A	6,68	1,75	5,64	0,00
TIG06B	7,28	1,86	5,42	0,00
<b>TIG06 (Média)</b>	<b>6,98</b>	<b>1,81</b>	<b>5,53</b>	<b>0,00</b>
MAG06A	38,19	2,99	11,63	3,33
MAG06B	38,22	2,93	9,76	3,50
<b>MAG06 (Média)</b>	<b>38,21</b>	<b>2,96</b>	<b>10,70</b>	<b>3,42</b>

Tabela B.7 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 07.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM07A	61,38	4,06	16,88	2,82
TDM07B	59,26	3,61	16,43	2,65
<b>TDM07 (Média)</b>	<b>60,32</b>	<b>3,84</b>	<b>16,66</b>	<b>2,74</b>
TIG07A	11,86	2,03	7,85	0,00
TIG07B	10,75	2,09	7,79	0,00
<b>TIG07 (Média)</b>	<b>11,31</b>	<b>2,06</b>	<b>7,82</b>	<b>0,00</b>
MAG07A	53,76	3,16	15,58	2,82
MAG07B	55,38	3,95	14,73	2,93
<b>MAG07 (Média)</b>	<b>54,57</b>	<b>3,56</b>	<b>15,16</b>	<b>2,88</b>

Tabela B.8 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 08.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM08A	38,17	3,33	9,82	3,50
TDM08B	35,37	3,39	9,82	3,22
<b>TDM08 (Média)</b>	<b>36,77</b>	<b>3,36</b>	<b>9,82</b>	<b>3,36</b>
TIG08A	3,19	1,35	5,31	0,00
TIG08B	4,37	1,02	5,02	0,00
<b>TIG08 (Média)</b>	<b>3,78</b>	<b>1,19</b>	<b>5,17</b>	<b>0,00</b>
MAG08A	34,27	3,16	8,80	3,27
MAG08B	35,24	2,77	8,58	3,44
<b>MAG08 (Média)</b>	<b>34,76</b>	<b>2,97</b>	<b>8,69</b>	<b>3,36</b>

Tabela B.9 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 09.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM09A	42,59	3,22	12,87	2,45
TDM09B	43,48	3,10	13,15	2,43
<b>TDM09 (Média)</b>	<b>43,04</b>	<b>3,16</b>	<b>13,01</b>	<b>2,44</b>
TIG09A	9,88	2,09	7,73	0,00
TIG09B	9,79	1,81	7,51	0,00
<b>TIG09 (Média)</b>	<b>9,84</b>	<b>1,95</b>	<b>7,62</b>	<b>0,00</b>
MAG09A	36,01	2,37	12,48	2,77
MAG09B	40,78	2,82	13,04	2,82
<b>MAG09 (Média)</b>	<b>38,40</b>	<b>2,60</b>	<b>12,76</b>	<b>2,80</b>

Tabela B.10 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 10.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM10A	51,03	3,50	13,60	2,77
TDM10B	46,91	3,50	14,00	2,71
<b>TDM10 (Média)</b>	<b>48,97</b>	<b>3,50</b>	<b>13,80</b>	<b>2,74</b>
TIG10A	6,61	1,41	6,55	0,00
TIG10B	7,56	1,64	6,77	0,00
<b>TIG10 (Média)</b>	<b>7,09</b>	<b>1,53</b>	<b>6,66</b>	<b>0,00</b>
MAG10A	36,33	2,93	12,80	2,31
MAG10B	39,80	3,33	11,51	2,65
<b>MAG10 (Média)</b>	<b>38,07</b>	<b>3,13</b>	<b>12,16</b>	<b>2,48</b>

Tabela B.11 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 11.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM11A	59,94	3,61	16,37	2,65
TDM11B	56,87	3,33	15,69	2,88
<b>TDM11 (Média)</b>	<b>58,41</b>	<b>3,47</b>	<b>16,03</b>	<b>2,77</b>
TIG11A	4,42	1,35	4,74	0,00
TIG11B	4,42	1,24	4,80	0,00
<b>TIG11 (Média)</b>	<b>4,42</b>	<b>1,30</b>	<b>4,77</b>	<b>0,00</b>
MAG11A	54,78	3,27	14,40	3,05
MAG11B	55,23	3,22	14,68	2,88
<b>MAG11 (Média)</b>	<b>55,01</b>	<b>3,25</b>	<b>14,54</b>	<b>2,97</b>

Tabela B.12 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 12.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM12A	47,83	3,67	12,02	2,82
TDM12B	40,92	3,22	12,02	2,96
<b>TDM12 (Média)</b>	<b>44,38</b>	<b>3,45</b>	<b>12,02</b>	<b>2,89</b>
TIG12A	9,45	1,75	6,72	0,00
TIG12B	11,04	1,92	7,06	0,00
<b>TIG12 (Média)</b>	<b>10,25</b>	<b>1,84</b>	<b>6,89</b>	<b>0,00</b>
MAG12A	34,94	2,88	10,27	2,71
MAG12B	38,48	3,05	10,75	2,88
<b>MAG12 (Média)</b>	<b>36,71</b>	<b>2,97</b>	<b>10,51</b>	<b>2,80</b>

Tabela B.13 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 13.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM13A	44,29	2,96	12,36	2,71
TDM13B	39,45	3,16	12,11	2,37
<b>TDM13 (Média)</b>	<b>41,87</b>	<b>3,06</b>	<b>12,24</b>	<b>2,54</b>
TIG13A	3,18	1,07	4,12	0,00
TIG13B	2,31	0,90	3,67	0,00
<b>TIG13 (Média)</b>	<b>2,75</b>	<b>0,99</b>	<b>3,90</b>	<b>0,00</b>
MAG13A	36,53	2,60	11,68	2,48
MAG13B	36,39	2,48	11,23	2,37
<b>MAG13 (Média)</b>	<b>36,46</b>	<b>2,54</b>	<b>11,46</b>	<b>2,43</b>

Tabela B.14 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 14.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM14A	38,94	3,39	8,64	3,33
TDM14B	41,13	3,47	10,16	3,22
<b>TDM14 (Média)</b>	<b>40,04</b>	<b>3,43</b>	<b>9,40</b>	<b>3,28</b>
TIG14A	8,58	1,98	6,60	0,00
TIG14B	9,20	1,52	7,06	0,00
<b>TIG14 (Média)</b>	<b>8,89</b>	<b>1,75</b>	<b>6,83</b>	<b>0,00</b>
MAG14A	35,67	3,16	9,09	3,27
MAG14B	38,49	2,85	8,64	4,04
<b>MAG14 (Média)</b>	<b>37,08</b>	<b>3,01</b>	<b>8,87</b>	<b>3,66</b>

Tabela B.15 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 15.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM15A	39,32	3,18	11,66	2,44
TDM15B	33,99	3,84	10,78	1,92
<b>TDM15 (Média)</b>	<b>36,66</b>	<b>3,51</b>	<b>11,22</b>	<b>2,18</b>
TIG15A	8,49	1,69	6,60	0,00
TIG15B	6,75	1,66	1,58	0,00
<b>TIG 15 (Média)</b>	<b>7,62</b>	<b>1,68</b>	<b>4,09</b>	<b>0,00</b>
MAG15A	39,27	3,06	11,52	2,66
MAG15B	35,82	3,22	10,41	2,45
<b>MAG15 (Média)</b>	<b>37,55</b>	<b>3,14</b>	<b>10,97</b>	<b>2,56</b>

Tabela B.16 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 16.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM16A	47,04	4,15	10,93	3,52
TDM16B	48,41	4,09	11,60	3,64
<b>TDM16 (Média)</b>	<b>47,73</b>	<b>4,12</b>	<b>11,27</b>	<b>3,58</b>
TIG16A	3,75	1,18	4,80	0,00
TIG16B	4,54	1,35	4,85	0,00
<b>TIG16 (Média)</b>	<b>4,15</b>	<b>1,27</b>	<b>4,83</b>	<b>0,00</b>
MAG16A	46,53	3,67	10,67	3,95
MAG16B	42,99	3,16	10,67	3,95
<b>MAG16 (Média)</b>	<b>44,76</b>	<b>3,42</b>	<b>10,67</b>	<b>3,95</b>

Tabela B.17 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 17.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM17A	48,73	3,05	15,19	2,20
TDM17B	53,29	3,10	16,48	2,09
<b>TDM17 (Média)</b>	<b>51,01</b>	<b>3,08</b>	<b>15,84</b>	<b>2,15</b>
TIG17A	9,92	1,86	6,89	0,00
TIG17B	9,95	1,86	7,68	0,00
<b>TIG17 (Média)</b>	<b>9,94</b>	<b>1,86</b>	<b>7,29</b>	<b>0,00</b>
MAG17A	37,37	2,14	12,36	2,60
MAG17B	41,76	2,31	12,42	3,10
<b>MAG17 (Média)</b>	<b>39,57</b>	<b>2,23</b>	<b>12,39</b>	<b>2,85</b>

Tabela B.18 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 18.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM18A	30,36	2,77	9,37	3,05
TDM18B	30,12	2,93	8,24	3,10
<b>TDM18 (Média)</b>	<b>30,24</b>	<b>2,85</b>	<b>8,81</b>	<b>3,08</b>
TIG18A	3,43	1,35	3,78	0,00
TIG18B	2,57	1,24	3,78	0,00
<b>TIG18 (Média)</b>	<b>3,00</b>	<b>1,30</b>	<b>3,78</b>	<b>0,00</b>
MAG18A	27,35	2,37	8,18	2,94
MAG18B	21,97	2,37	7,51	2,60
<b>MAG18 (Média)</b>	<b>24,66</b>	<b>2,37</b>	<b>7,85</b>	<b>2,77</b>

Tabela B.19 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 19.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM19A	47,85	2,99	13,89	2,71
TDM19B	47,97	3,39	14,51	2,60
<b>TDM19 (Média)</b>	<b>47,91</b>	<b>3,19</b>	<b>14,20</b>	<b>2,66</b>
TIG19A	7,06	1,13	7,23	0,00
TIG19B	7,74	1,41	6,21	0,00
<b>TIG19 (Média)</b>	<b>7,40</b>	<b>1,27</b>	<b>6,72</b>	<b>0,00</b>
MAG19A	41,65	2,79	13,29	2,79
MAG19B	35,72	2,62	11,94	2,54
<b>MAG19 (Média)</b>	<b>38,69</b>	<b>2,71</b>	<b>12,62</b>	<b>2,67</b>

Tabela B.20 – Dimensões das amostras do cordão de solda para o experimento 20.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Penetração (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)
TDM20A	36,19	3,47	11,43	2,37
TDM20B	41,59	3,13	12,87	2,37
<b>TDM20 (Média)</b>	<b>38,89</b>	<b>3,30</b>	<b>12,15</b>	<b>2,37</b>
TIG20A	5,96	1,35	5,59	0,00
TIG20B	6,18	1,64	6,27	0,00
<b>TIG20 (Média)</b>	<b>6,07</b>	<b>1,50</b>	<b>5,93</b>	<b>0,00</b>
MAG20A	33,22	2,88	10,50	2,43
MAG20B	33,55	2,71	10,75	2,46
<b>MAG20 (Média)</b>	<b>33,39</b>	<b>2,80</b>	<b>10,63</b>	<b>2,45</b>