

Otimização de soldagem robotizada em ligas de alumínio com modo de transferência Pulsado e CMT+P através do método Taguchi

Guilherme Simonato

Relatório da Dissertação Final apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Industrial – Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

José Alexandre de Carvalho Gonçalves

Roger Navarro Verástegui

Setembro 2017

Agradecimentos

Aos professores João Ribeiro e José Golçalves, docentes do IPB, pelas suas orientações, críticas, colaborações e principalmente pela oportunidade de trabalhar neste projeto elevando meu conhecimento contribuindo no enriquecendo da minha formação acadêmica e científica.

Ao Roger Verástegui, docente da UTFPR, pelos ensinamentos proporcionados durante minha graduação, disponibilidade, críticas e por aceitar meu convite em me orientar no programa de dupla diplomação.

Aos colegas que tive o prazer de trabalhar em conjunto neste projeto, Arlindo, Eduardo e Vinícius, gerando muitas histórias e risadas.

Aos meus pais Onivaldo e Rosângela, que me proporcionaram toda educação, caráter e valores, sempre me apoiando em minhas decisões, me aconselhando para que meus sonhos sempre se tornem realidade.

A minha irmã Arianne e ao David pelo apoio e conselhos, e especialmente a minha sobrinha Luiza que me proporciona muita alegria e risadas.

A minha namorada Letícia, pelo companheirismo, paciência, confiança, apoio e compreensão em todos os momentos, compartilhando a realização dos nossos sonhos pessoais e acadêmicos.

A toda minha família, especialmente as minhas avós Maria e Cleonice, que me proporcionaram todo carinho e ensinamentos de vida que sempre levarei comigo.

Aos meus amigos e amigas, do Brasil e de Portugal que tive a oportunidade de conhecer, que contribuíram diretamente ou indiretamente para este trabalho.

Resumo

Nas últimas décadas, as ligas de alumínio têm vindo a ser cada vez mais utilizadas em diferentes campos industriais. Apesar das enormes vantagens deste tipo de materiais, surgiram grandes desafios relacionados com os processos de transformação, nomeadamente, os processos de ligação por soldagem tradicionais que, para as ligas de alumínio, são mais difíceis de efetuar com a qualidade exigida. No sentido de ultrapassar estas dificuldades, algumas indústrias e centros de pesquisa têm-se dedicado ao estudo da soldagem de ligas de alumínio. Como tal, este trabalho insere-se nesta área de pesquisa.

Pretendeu-se determinar os parâmetros ótimos de soldagem e influência de cada um deles na qualidade de soldagem para dois métodos distintos de transferência de material de adição processo MIG, Pulsado e CMT+P. Para tal, implementou-se um planeamento de experimentos baseado numa matriz ortogonal de Taguchi L_{27} utilizando os parâmetros de início e final de soldagem. Os experimentos foram executados nos laboratórios do Instituto Politécnico de Bragança, utilizando um robô industrial e foram soldadas 30 chapas da liga Al 6082-T6. Após a realização dos experimentos, fez-se controle da qualidade a partir da medição de algumas dimensões do cordão de soldagem, especificamente, largura, penetração e reforço. Os resultados das medições foram tratados estatisticamente de modo a obter os objetivos pretendidos, para tal, recorreu-se a uma análise de variância e à razão sinal/ruído desenvolvida por Taguchi.

Verificou-se que as combinações ótimas são distintas para os diferentes modos de transferência, bem como, os valores obtidos nas medições para a mesma combinação de parâmetros. Quanto a influência dos parâmetros nos fatores de controle, ela varia em função do modo de transferência e do fator de controle. Assim, para o modo de transferência pulsado, na penetração o parâmetro mais influente é a correção anti-adesão (14,3%) enquanto que na largura do cordão é mais influente o pré-fluxo de gás (21,5%). Já para o modo CMT+P, o valor nominal do gás é o fator mais influente, tanto para a largura do cordão (20,6%) como para penetração do cordão de solda (13,55%).

A utilização do método Taguchi demonstrou ser uma metodologia robusta para a determinação da combinação ótima de parâmetros para a obtenção de soldaduras de qualidade, bem como, permitiu definir quais os parâmetros mais influentes no controle da qualidade de soldagem.

Palavras-chave: soldagem MIG robotizada; alumínio; parâmetros de soldagem; *Cold Metal Transfer*; método de Taguchi; análise da variância.

Abstract

In the last decades, the aluminum alloys are being widely used in the different fields of the industry. Despite of the great advantages of this type of materials, there are big challenges related to the transformation processes as joining with regular welding of aluminum alloys, that are hardly performed with the quality required. To overcome these difficulties, some industries and research centers are investigating the welding of aluminum alloys. As well as the present paper is part of this field of research.

The goal was determining the optimal welding parameters and the influence of each one on the quality of MIG welding for two different transference methods of filling material, pulse and CMT+P. It was implemented the design of experiments based on the Taguchi orthogonal array L_{27} using the initial and final welding parameters. The experiments were performed at the laboratories of the Instituto Politécnico de Bragança, using an industrial robot to weld 30 plates of Al 6082-T6. After the experiments, the quality control was performed by the measurement of some dimensions of the welded bead, particularly the width, penetration and reinforcement. The data was statistically treated to achieve the aimed objectives, through the analysis of variance and signal to noise ratio developed by Taguchi.

It was verified that the optimal combinations were different between the transference methods, as well as the values obtained from the measurements for the same combination of parameters. About the influence of parameters on the control factors, it varies in function of the transference method and the control factor. For the transference method pulse, for penetration the most influent parameter is the anti-adherent correction (14,3%) and for width the most influent is the gas pre-flow (21,5%). The method CMT+P the nominal gas value is the most influent factor for both width (20,6%) and penetration (13,55%).

The utilization of the Taguchi method proved to be a robust methodology to determine the optimal parameters combination to get quality welds, as well as allows defining which parameters are more influents on the welding quality control.

Key-words: Robotic MIG Welding, aluminum, welding parameters, cold metal transfer, Taguchi method, analysis of variance.

Sumário

Lista de símbolos	xi
Lista de abreviaturas	xiii
Lista de tabelas	xiv
Lista de figuras	xv
Capítulo I – Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do trabalho.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organização do trabalho.....	4
Capítulo II – Fundamentos Teóricos	5
2.1 O alumínio e suas ligas.....	5
2.1.1 Propriedades gerais das ligas de alumínio.....	7
2.1.2 Influência dos elementos de liga na soldabilidade do alumínio.....	9
2.2 Soldagem GMAW	11
2.2.1 Modos de transferência metálica no processo GMAW	12
2.2.1.1 Transferência por curto-circuito	13
2.2.1.2 Transferência globular.....	14
2.2.1.3 Transferência goticular ou spray	15
2.2.2 Variáveis do processo GMAW.....	16
2.2.3 Influência das variáveis de soldagem nas propriedades do cordão	16
2.2.4 Soldagem com arco pulsado.....	19
2.2.4.1 Curva característica pulsado.....	21
2.2.5 Soldagem CMT	22
2.2.5.1 Curvas Características CMT.....	24
2.2.5.2 Curvas Características CMT+P	25
2.2.5.3 Componentes para a realização da soldagem CMT	27
2.3 Método Taguchi.....	28
2.3.1 Função Perda	31
2.3.2 Razão sinal-ruído.....	32
2.3.3 ANOVA.....	34
Capítulo III – Procedimento Experimental.....	35
3.1 Equipamentos	35
3.2 Consumíveis	36
3.3 Ensaio Experimentais.....	37

3.3.1 Considerações iniciais	37
3.3.2 Seleção dos parâmetros de soldagem	37
3.3.3 Seleção da matriz ortogonal Taguchi	39
3.3.4 Preparação das placas	41
3.3.5 Fixação das chapas na mesa	41
3.3.6 Programação da trajetória do robô para a soldagem.....	42
3.3.7 Realização da soldagem.....	44
3.3.8 Corte dos cordões de solda	47
3.3.9 Embutimento do baquelite.....	49
3.3.10 Lixamento.....	50
3.3.11 Polimento.....	51
3.3.12 Ataque químico	51
3.3.13 Preparação do microscópico	52
3.3.14 Medições.....	53
3.3.15 Cálculo razão sinal/ruído	54
3.3.16 Seleção da melhor combinação de parâmetros.....	54
3.3.17 ANOVA.....	56
Capítulo IV – Discussão de Resultados.....	57
4.1 Resultados e discussões	57
4.1.1 Medidas dos cordões de solda	57
4.1.2 Razão Sinal/ruído	62
4.1.3 Seleção dos níveis adequados para o teste de confirmação.....	67
4.1.4 Testes de confirmação	69
4.1.5 Análise ANOVA	71
Capítulo V – Conclusões e Propostas para trabalhos futuros.....	75
5.1 Conclusões.....	75
5.2 Proposta para trabalhos futuros	77
Referências Bibliográficas.....	78
Anexo I.....	84
Anexo II.....	92
Anexo III	98
Anexo IV	100

Lista de símbolos

A	Amperes
CC ⁺	Corrente contínua com polaridade positiva
CC ⁻	Corrente contínua com polaridade negativa
cm/min	Centímetros por minuto
dB	Decibéis
I _p	Corrente de pulso
I _b	Corrente de base
kgf/mm ²	Quilograma força por milímetros quadrados
l/min	Litros por minuto
m/min	Metros por minuto
mm	Milímetros
mm/s	Milímetros por segundo
Q _m	Quadrado médio
s	Segundos
S/N	Sinal/ruído
S/N _L	Sinal/ruído (quanto maior melhor)
S/N _t	Sinal/ruído (nominal é melhor)
S/N _s	Sinal/ruído (Quanto menor melhor)
S _q	Soma dos quadrados
t _b	Tempo de base
t _p	Tempo de pulso
V	Volts
L	Perda devido ao desvio da característica
y	Valor da característica de qualidade
T	Valor nominal ou valor alvo da característica de qualidade
k	Coefficiente de perda de qualidade
LIE	Limite inferior das especificações
LSE	Limite superior das especificações
\bar{y}	Média dos dados observados

s_y^2	Variância de y
n	Número de observações
y_i	Dados observados
c	Confiabilidade
DOF	Graus de liberdade
n_A	Número de níveis para o fator A
n_B	Números de níveis para o fator B
n_n	Número de níveis para o n fator
$\hat{\eta}$	Razão S/N estimada
η_m	Medida total da razão S/N
$\bar{\eta}_l$	Razão S/N média para o nível ótimo
q	Número dos principais parâmetros de projeto que afetam a característica de qualidade

Lista de abreviaturas

AA	Aluminum Association
Al	Alumínio
Al-Cu	Alumínio-Cobre (liga)
Al-Mn	Alumínio-Manganês (liga)
Al-Si	Alumínio-Silício (liga)
Al-Mg	Alumínio-Magnésio (liga)
Al-Mg-Si	Alumínio-Magnésio e Silício (liga)
Al-Zn	Alumínio-Zinco (liga)
ANOVA	Análise de variância
CMT	Cold Metal Transfer
CMT+P	Cold Metal Transfer Pulse
ESTiG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GMAW-P	Gas Metal Arc Welding Pulse
GDL	Graus de liberdade
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
L	Largura
LE	Laboratório de eletrotecnia
LTM	Laboratório de tecnologia mecânica
LTT	Laboratório de tecnologia térmica
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
P	Penetração
R	Reforço
SAW	Submerged arc welding

Lista de tabelas

Tabela 1 – Sistema de classificação das ligas de alumínio trabalháveis em função dos principais elementos de adição [Adaptada de 36].	6
Tabela 2 – Parâmetros e níveis selecionados para o modo Pulsado e CMT	38
Tabela 3 – Matriz ortogonal Taguchi L27.....	40
Tabela 4 – Parâmetros para embutimento a quente, na prensa hidráulica [67].	50
Tabela 5 – Composição química da solução Osmond [67].	52
Tabela 6 – Medidas obtidas das amostras utilizando modo Pulsado.....	58
Tabela 7 – Medidas obtidas das amostras utilizando modo CMT+P.	59
Tabela 8 – Valores de sinal/ruído para o modo Pulsado.	63
Tabela 9 – Valores da razão sinal/ruído para o modo CMT+P.	64
Tabela 10 – Parâmetros e níveis selecionados para o teste de confirmação para o modo Pulsado.	67
Tabela 11 – Valores dos parâmetros e níveis selecionados para o teste de confirmação para o modo Pulsado.	68
Tabela 12 – Parâmetros e níveis selecionados para o teste de confirmação para o modo CMT+P.	68
Tabela 13 – Valores dos parâmetros e níveis selecionados para o teste de confirmação para o modo CMT+P.	69
Tabela 14 – Medições da amostra de teste de confirmação Pulsado.....	69
Tabela 15 – Medições da amostra de teste de confirmação CMT+P.	70
Tabela 16 – Razão S/N, S/N estimado, melhoria necessária do teste de confirmação do modo Pulsado.	70
Tabela 17 – Razão S/N, S/N estimado, melhoria necessária do teste de confirmação do modo CMT+P.	70
Tabela 18 – Resultados da análise ANOVA da largura para o modo Pulsado.....	71
Tabela 19 – Resultados da análise ANOVA da penetração para o modo Pulsado.....	72
Tabela 20 – Resultados da análise ANOVA do reforço para o modo Pulsado.	72
Tabela 21 – Resultados da análise ANOVA da largura para o modo CMT+P.	73
Tabela 22 – Resultados da análise ANOVA da penetração para o modo CMT+P.	73
Tabela 23 – Resultados da análise ANOVA do reforço para o modo CMT+P.....	74

Lista de figuras

Figura 1 – Soldagem GMAW [41].	12
Figura 2 – Esquema da sequência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG [42].	13
Figura 3 – Exemplificação de transferência globular e globular repelida [47].	14
Figura 4 – Variação do diâmetro e do número de gotas transferidas por unidade de tempo com a corrente de soldagem [Adaptada de 45].	15
Figura 5 – Influência da corrente no formato do cordão de solda, em seção transversal, depositados por SAW em chapas de aço carbono [47].	17
Figura 6 – Influência da tensão no formato do cordão de solda, em seção transversal, depositados por SAW em chapas de aço carbono [47].	17
Figura 7 – Influência da velocidade de soldagem no formato do cordão de solda, em seção transversal, depositados por SAW em chapas de aço carbono [47].	18
Figura 8 – Influência da posição da tocha e sentido de soldagem no formato do cordão de solda em seção transversal [49].	18
Figura 9 – Geometria e penetração do cordão utilizando diferentes gases [52].	19
Figura 10 – Forma de onda da corrente no processo GMAW-P; (a) idealizado; (b) mais representativa para equipamentos comerciais [48].	20
Figura 11 – Visão geral dos parâmetros-curvas características de pulsação [58].	21
Figura 12 – Movimentação do arame no processo CMT [61].	23
Figura 13 – Visão geral dos parâmetros-curvas características CMT [58].	24
Figura 14 – Visão geral dos parâmetros-curvas características CMT+P [58].	25
Figura 15 – Principais componentes para a realização de soldagem CMT [61].	27
Figura 16 – Função Perda de Taguchi [64].	31
Figura 17 – Guilhotina hidráulica MINI 320.	41
Figura 18 – Suporte de fixação das chapas na mesa do robô.	41
Figura 19 – Posicionamento da chapa de cobre utilizada.	42
Figura 20 – Exemplificação da sequência dos programas utilizados em uma bateria de solda.	44
Figura 21 – Sistema em posição de segurança.	44
Figura 22 – Esquemática da trajetória de deslocamento e soldagem.	45

Figura 23 – Região atingida pelos fumos e região após a limpeza dos resíduos.....	46
Figura 24 – Ponta do arame após a realização da soldagem.	46
Figura 25 – Sequência e posição dos cordões realizados na soldagem.	47
Figura 26 – Máquina de corte de amostras.....	48
Figura 27 – Cortes realizados nos cordões para a obtenção de amostras.	48
Figura 28 – Máquina Embutidora Struers LaboPress-1.	49
Figura 29 – Máquina de polir Struers LaboPol-25.....	50
Figura 30 – Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados [Adaptada de 67].....	51
Figura 31 – Microscópio Veho VMS-005-LCD.	52
Figura 32 – Conjunto de amostras após o processo de ataque químico.	53
Figura 33 – Medições realizadas no cordão de solda [Adaptada de 68].	54
Figura 34 – Gráfico comparativo da largura média entre Pulsado e CMT+P.	60
Figura 35 – Gráfico comparativo da penetração média entre Pulsado e CMT+P.	60
Figura 36 – Gráfico comparativo do reforço médio entre Pulsado e CMT+P.	61
Figura 37 – Curvas da razão sinal/ruído média para largura no modo Pulsado.	65
Figura 38 – Curvas da razão sinal/ruído média para penetração no modo Pulsado.	65
Figura 39 – Curvas da razão sinal/ruído média para reforço no modo Pulsado.....	65
Figura 40 – Curvas da razão sinal/ruído média para largura no modo CMT+P.....	66
Figura 41 – Curvas da razão sinal/ruído média para penetração no modo CMT+P.....	66
Figura 42 – Curvas da razão sinal/ruído média para reforço no modo CMT+P.	66

Capítulo I – Introdução

1.1 Enquadramento do trabalho

As exigências ambientais no setor dos transportes são cada vez mais apertadas no sentido da diminuição da libertação de partículas poluentes e na eficiência mais elevada dos veículos. Para alcançar essas metas, as indústrias deste setor têm apostado no desenvolvimento de motores mais eficientes e na diminuição do peso dos veículos. Assim, tem-se vindo a verificar a substituição de materiais classicamente utilizados, especialmente as ligas ferro-carbónicas, que possuem elevada resistência mecânica, porém são materiais com alta densidade, por materiais menos densos como os compósitos [1], ligas de magnésio [2] e ligas de alumínio [3]. Estes materiais possuem boas propriedades mecânicas, elevada resistência à corrosão atmosférica [4] e uma relação peso/volume muito satisfatória na aplicação de algumas áreas do setor de transporte, como a indústria automóvel [5, 6, 7], naval [8], ferroviária [9] e aeronáutica [10, 11], destacando as ligas de alumínio devido ao processo de fabricação ser mais simples e o preço ser inferior ao das ligas de magnésio [4] ou os materiais compósitos [12].

Apesar das evidentes vantagens das ligas de alumínio, elas possuem algumas desvantagens quando comparadas com as ligas ferro-carbónicas, podendo evidenciar a necessidade de um maior controle de qualidade nos processos de fabricação [13] e de uma maior dificuldade na realização de processos de soldagem deste material [14, 15]. Devido às dificuldades para soldar ligas de alumínio utilizando os processos convencionais de soldagem por arco elétrico protegido por gás, MIG e TIG, é vulgar recorrer a outros processos de ligação, nomeadamente, ligações por rebitagem, soldagem de resistência por pontos, ligação por adesivos estruturais e, mais recentemente, soldadura com laser [3, 16] e por fricção linear [17]. Um dos fenómenos mais limitativos da soldagem por fusão em ligas de alumínio com os processos tradicionais, prende-se com o aparecimento de tensões residuais geradas durante o processo de soldagem que, por sua vez, podem provocar fissuração [16] ou empenos da estrutura [3, 16]. Um nível de tensões residuais elevado tem outra consequência profundamente negativa na indústria de transportes, e

está relacionada a diminuição significativa da vida à fadiga em estruturas soldadas [18, 19].

Uma das características que comprometem a soldabilidade do alumínio é a sua camada de óxido superficial, resultante da reação do alumínio com o oxigênio gerando o composto Al_2O_3 . Esta película de óxido protege o metal contra a corrosão, porém, possui um ponto de fusão muito elevado quando comparado com o alumínio. Como tal, a temperatura de soldagem deverá ser suficientemente elevada para desagregar esta película de óxido e mantenha-se estável, mesmo após a da fusão do alumínio [20].

Apesar destas implicações para realizar a soldagem em ligas de alumínio, é possível efetuar a solda em estruturas hiperestáticas utilizando métodos convencionais (MIG ou TIG) porém com a seleção e rígido controle de parâmetros de soldagem, preparação adequada de juntas, fixação dos elementos a serem soldados com o grau de rigidez ajustada e uma sequência de soldagem apropriada, para limitar a distorção e as tensões residuais [21, 22]. Para este controle ser efetivo, é necessário ajustar e balancear estes parâmetros durante a realização da soldagem, obrigando a que o processo de soldagem seja manual. Isto torna o processo de automatização da soldagem em ligas de alumínio algo complexo, necessitando de um desenvolvimento de estudos e ensaios experimentais para que seja possível soldar este material em estruturas hiperestáticas garantindo um controle na qualidade final.

A utilização de ensaios experimentais permite selecionar a combinação ótima dos parâmetros de soldagem e visando realizar um número menor e restrito de ensaios, optou-se pela utilização de um método de otimização muito difundido e utilizado na área de controle de qualidade em indústrias, denominado de método Taguchi [24, 25]. A partir deste método, é possível definir planos de ensaios experimentais, onde são indicadas diversas combinações de parâmetros de soldagem sendo que, entre essas combinações, é possível obter o valor ótimo para determinada característica de controle em estudo, como a penetração, largura e reforço do cordão de solda através do teste de confirmação. A utilização deste método tem se tornado muito popular em vários processos de fabricação [25, 26], evidenciando o processo de soldagem [28, 29] que permite determinar os parâmetros ótimos de soldagem em processos convencionais como TIG [29], em processos mais recentes como a soldagem a laser [30] e até mesmo no processo de solda

por fricção linear [32]. Considerada uma ferramenta poderosa para o planejamento de ensaios no âmbito de processos de fabricação, o método Taguchi é utilizado, de forma frequente, associado a outras técnicas de tratamento estatístico [32, 33] ou de otimização [34], permitindo realizar uma análise profunda, mais eficiente e completa dos resultados obtidos através dos ensaios.

1.2 Objetivos

Na primeira fase deste trabalho, houve a necessidade de definir um planejamento do tipo de soldagem a ser realizado e estudado, quais os parâmetros a serem implementados, qual o método analítico estatístico a ser utilizado para o tratamento dos dados dos experimentos e quais as liga de alumínio a utilizar para o metal base e para o metal de adição na realização das soldagens ensaiadas.

Um dos objetivos principais deste estudo é o de analisar e comparar, recorrendo ao método Taguchi, as dimensões das geometrias dos cordões de solda realizados através da soldagem no modo transferência Pulsado e CMT+P em liga de alumínio Al 6082-T6. Na sequência desta análise, calculou-se a razão sinal/ruído para determinar a combinação ótima dos parâmetros para a largura, penetração e reforço para o modo de transferência Pulsado e CMT+P.

Um outro objetivo importante, é a determinação dos parâmetros mais influentes na geometria e dimensões da largura, penetração e reforço do cordão de solda para os modos de transferência Pulsado e CMT+P. Para isso, recorreu-se a uma ferramenta estatística, a análise da variância (ANOVA), que permite determinar a contribuição de cada parâmetro a partir das medições efetuadas durante os ensaios experimentais.

1.3 Organização do trabalho

No primeiro capítulo, são apresentados o enquadramento do trabalho, os objetivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2, abordaram-se as ligas de alumínio, demonstrando os diferentes elementos de liga e a influência em sua soldabilidade. Os princípios de funcionamento da soldagem GMAW também foram apresentados neste capítulo, diferenciando os modos de transferência, as variáveis de soldagem e suas influências, o modo Pulsado e CMT com suas curvas características e os principais componentes que permitem realizar este tipo de soldagem. Também foram abordados, de forma teórica, o método Taguchi e a análise ANOVA, sendo os métodos estatísticos utilizados neste trabalho.

No capítulo 3, são descritos os materiais utilizados e as fases da metodologia aplicada para este trabalho detalhando a realização de cada procedimento.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões deste estudo, iniciando com as medições da largura, penetração e reforço, para o modo Pulsado e CMT+P, que foram utilizados para efetuar os cálculos da razão sinal/ruído apresentados. As curvas da razão sinal/ruído são abordadas e analisadas permitindo selecionar a combinação ótima dos parâmetros para realizar o teste de confirmação. Também é apresentado o tratamento estatístico ANOVA afim de verificar quais os parâmetros mais influentes para cada dimensão da geometria do cordão de solda em estudo.

Por fim, no último capítulo são abordadas as conclusões do trabalho que foram atingidas com êxito, determinou-se a sequência ótima de parâmetros para a largura, penetração e reforço do modo Pulsado e CMT+P, obtiveram-se as melhorias necessárias, através dos testes de confirmação, da razão S/N das dimensões do modo Pulsado e CMT+P para atingir a razão S/N ideal e evidenciaram-se os principais parâmetros mais influentes e o nível de contribuição para cada dimensão em estudo. Também são apresentadas e discutidas as possibilidades e alternativas para a realização de trabalhos futuros.

Capítulo II – Fundamentos Teóricos

2.1 O alumínio e suas ligas

Possuindo um conjunto único de propriedades mecânicas, físicas e químicas sem similar na natureza, o alumínio é o segundo metal mais abundante. Suas principais características são a baixa densidade em relação ao aço, alta resistência a corrosão, condutividade térmica e elétrica elevada, e coeficiente de expansão linear aproximadamente duas vezes maior que a do aço. Devido a sua afinidade química com o oxigênio, uma camada de óxido do tipo Al_2O_3 é formada na superfície do material quando exposta a meio oxidante. Essa camada de óxido possui uma espessura muito fina e alta tenacidade, que dificulta sua ruptura por tensões superficiais geradas durante sua formação. Sendo uma excelente proteção contra a corrosão, também é uma barreira a ser vencida no processo de soldagem, pois o alumínio funde-se a $660\text{ }^\circ\text{C}$ enquanto a camada de óxido só se funde ao alumínio quando a temperatura se eleva mais de $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Por ser um elemento que se liga facilmente a outros metais, é possível formar as ligas de alumínio que tem como objetivo melhorar suas propriedades mecânica, pois o alumínio em estado puro possui algumas limitações referente à resistência mecânica e dureza, que são relativamente baixas [35].

Os elementos de liga podem ser divididos para qual característica principal terá influência como resistência mecânica, resistência a corrosão, fluidez no preenchimento de moldes, entre outros, e os de função acessória como o controle de microestrutura e das impurezas. Os principais elementos de liga são: cobre (Cu), magnésio (Mg), manganês (Mn), silício (Si) e zinco (Zn) [36].

Independente do processo de fabricação, as ligas de alumínio são encontradas em duas condições básicas, ligas fundidas que são encontradas em forma de laminados planos, extrudados e forjados, e ligas fundidas que são encontradas em formas de lingotes ou peças acabadas [35]. Neste trabalho detalharam-se as ligas trabalhadas, devido às mesmas serem utilizadas nos processos experimentais.

A classificação mais utilizada foi desenvolvida pela “Aluminum Association” (AA), classificando em sete grupos, se diferenciando pelos elementos básicos encontrados em sua composição química, como demonstrado na Tabela 1. Na série 1xxx, o segundo dígito indica modificações nos limites das impurezas, sendo o algarismo 0 (zero) representando que não há controle de impurezas ou que contém impurezas em seus limites naturais, enquanto que os algarismos de 1 a 9 indicam que houve controle especial de um ou mais elementos presentes como impurezas. Por exemplo, 1050 indica uma liga com no mínimo 99,50% de alumínio sem controle especial de impurezas, e 1350 indica a mesma pureza (99,50% de alumínio), mas com controle de uma ou mais impurezas. Os dois últimos números indicam a porcentagem de impurezas encontradas, por exemplo a liga 1050 e 1080, que consiste em alumínio não ligado com 99,50% e 99,80% de pureza, respectivamente. Nas outras séries, o segundo número representa modificações da liga, sendo o algarismo 0 (zero) indica uma liga original e os algarismos de 1 ao 9 indicam modificações da liga original. Por exemplo, 5356 e 5456 são modificações da liga alumínio-magnésio 5056. Do mesmo modo, 2017 é uma liga da série alumínio-cobre e 2117 é uma modificação desta. Os dois últimos números dígitos são arbitrários, servindo somente para identificar as diferentes ligas do grupo [36].

Tabela 1 – Sistema de classificação das ligas de alumínio trabalháveis em função dos principais elementos de adição [Adaptada de 36].

Série da liga	Principal elemento químico da liga
1xxx	Alumínio não ligado de no mínimo 99,00% de pureza
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos
9xxx	Série não utilizada

No grupo de ligas trabalháveis, há a classificação em relação a tratamentos térmicos, sendo as não tratáveis termicamente ligas em que só se consegue obter um

aumento de propriedades mecânicas através da deformação a frio, que consiste na deformação plástica do material, como laminação e trefilação, e as ligas tratáveis termicamente que possuem a características de obter um aumento apreciável de resistência mecânica. Nas ligas não tratáveis termicamente, após o aquecimento acima de determinadas temperaturas, como ocorre na soldagem, as propriedades obtidas só podem ser restauradas com a execução de uma deformação a frio adicional. As ligas trabalháveis não tratáveis termicamente são produzidas em várias têmperas, de acordo com o grau de encruamento e, em geral, são das séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx [36].

2.1.1 Propriedades gerais das ligas de alumínio

As propriedades das ligas e algumas características são diretamente influenciados pelo elemento da liga. Segundo Okumura e Taniguchi [37] e Alcan [36] cada série das ligas de alumínio possuem as seguintes características e aplicações:

- 1) Alumínio puro para uso industrial – Série 1xxx. Possui uma pureza compreendida entre 99,0% e 99,9%. Possui uma boa resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, e excelente flexibilidade. Esta liga é a mais utilizada na fabricação de estruturas, onde é exigido alta resistência a corrosão, sendo destinadas principalmente a tanques e tubulações para as indústrias químicas e petroquímica. Também são utilizadas em condutores elétricos, devido a sua elevada condutividade elétrica.
- 2) Liga de Al-Cu – Série 2xxx. Série típica de ligas tratáveis termicamente. Suas propriedades mecânicas são comparáveis às do aço doce, devido ao tratamento de endurecimento por precipitação após a solubilização. Sua resistência à corrosão é inferior às das outras séries. Esta liga é empregada quase que exclusivamente em estruturas rebitadas devido a sua soldabilidade deixar muito a desejar, sendo mais utilizada em aplicações de aeronaves, com ligas bastante conhecidas como a 2017 (duralumínio) e 2024 (superduralumínio).
- 3) Liga Al-Mn – Série 3xxx. São ligas não tratáveis termicamente e os diferentes níveis de resistência mecânica são obtidos a partir do encruamento a frio. Com a adição do

manganês ao alumínio, há um leve aumento na resistência mecânica e aumenta a resposta ao tratamento de encruamento, sem que isso reduza de forma significativa sua ductilidade ou resistência à corrosão. Apesar de que podem ser brasadas satisfatoriamente e soldadas por resistência com facilidade a utilização dessa liga não é muito comum em aplicações estruturais devido apresentarem resistências moderadas. As principais vantagens desta série são que a resistência à corrosão, a usinabilidade e soldabilidade são tão boas quanto às do alumínio puro, aliadas ainda às suas altas propriedades mecânicas.

- 4) Liga Al-Si – Série 4xxx. Esta série também é não tratável termicamente. Através da adição do silício, ocorre a diminuição do ponto de fusão e melhora de forma significativa a sua fluidez e dificilmente ocorrem problemas de trincas, conseqüentemente torna esta série muito indicada na aplicação de material de adição no processo de soldagem de fundidos e de ligas tratáveis termicamente.
- 5) Liga Al-Mg – Série 5xxx. Classificada como uma liga não tratável termicamente, é adicionado um dos elementos mais eficazes e largamente empregados na formação de ligas de alumínio, o magnésio, que é o principal agente pela elevação da resistência mecânica sob um trabalho a frio. Entre as ligas não tratáveis termicamente, esta série é que apresenta as maiores resistências mecânicas, possui uma alta resistência a corrosão na atmosfera marítima e soldadas com facilidade, devido a isso são muito utilizadas em aplicações estruturais em diversos campos, principalmente na área de transportes, como vagões ferroviários, embarcações, tanques rodoviários, entre outros.
- 6) Liga Al-Mg-Si – Série 6xxx. Nesta série encontram-se ligas tratáveis termicamente e possuem uma usinabilidade satisfatória, alta resistência a corrosão e soldabilidade. Através da combinação de magnésio e silício, ocorre a produção do composto siliceto de magnésio, influenciando em sua tratabilidade térmica e estabelecendo resistência mecânica média. Este tipo de liga pode sofrer uma redução de dureza significativa nas ZTAs, conseqüência do insumo de calor, sendo possível recuperar a resistência por um tratamento térmico completo após a soldagem. A liga 6063 é bastante reconhecida nesta série e é largamente empregada em esquadrias de alumínio para a construção civil.

7) Liga Al-Zn – Série 7xxx. Sendo também ligas tratáveis termicamente, podem conter magnésio como elemento de liga, ou porcentagens de cobre e cromo. Conhecidas como ultraduralumínio, possuem altíssima resistência mecânica, porém baixa resistência a corrosão e soldabilidade. Esta liga pode ser laminada em formas de chapas, lâminas ou extrudadas, com sua principal aplicação em estruturas de alto desempenho como a indústria aeroespacial e de defesa.

2.1.2 Influência dos elementos de liga na soldabilidade do alumínio

A soldabilidade é o termo em que se associa com a facilidade de realizar o processo de soldagem em uma liga, assegurando uma junta com adequada resistência mecânica, resistência à corrosão e, entre outras propriedades, quando necessárias. A utilização do alumínio está sendo cada vez maior em diversas áreas de aplicações, aumentando assim a necessidade de pesquisas e estudos na área de fabricação desse material, principalmente na soldagem, pois inicialmente o alumínio foi considerado com baixa soldabilidade devido ao emprego de técnicas semelhantes às que são empregadas nos materiais ferrosos, obtendo soldas com qualidades baixas [38].

Comparando o alumínio com o aço, compreendem-se os efeitos das propriedades físicas na soldabilidade. A condutividade térmica tem alta influencia na soldabilidade, sendo quase cinco vezes maior no alumínio do que no aço, significando que é necessário fornecer calor ao alumínio cerca de cinco vezes maior do que o valor requerido no aço para elevar sua temperatura na mesma massa. Portanto, é necessário o uso de uma fonte de calor com maior intensidade para realizar a soldagem com sucesso. A alta condutividade térmica, o alto coeficiente de expansão linear e a necessidade de maior aporte de calor podem influenciar consideravelmente em distorções durante o processo de soldagem. Esta alta condutividade térmica do alumínio torna a soldagem do alumínio mais rápida que a soldagem em aços, pois proporciona uma rápida solidificação da poça de solda [36].

Cada elemento de liga possui sua função de fornecer propriedades à liga de alumínio, alterando essas propriedades também há a alteração na soldabilidade de cada

liga em específico, melhorando ou dificultando a correta realização da solda. Segundo Okumura e Taniguchi [37] e Alcan [36], a variação da soldabilidade segue conforme a classificação das ligas de alumínio.

- 1) Alumínio puro para uso industrial – Série 1xxx. Possui uma soldabilidade bastante satisfatória pelos processos de fusão a arco, embora as estreitas faixas de fusão possam causar na ausência de fusão e outros defeitos.
- 2) Liga de Al-Cu – Série 2xxx. Devido esta liga ser muito propensa à fissuração a quente, a soldabilidade deixa muito a desejar pelos processos a arco.
- 3) Liga Al-Mn – Série 3xxx. Possui boa soldabilidade e não é suscetível à ocorrência de trincas de solidificação.
- 4) Liga Al-Si – Série 4xxx. Geralmente é utilizada como material de adição para a soldagem, possuindo excelente fluidez e raramente ocorre problemas de trincas na solda.
- 5) Liga Al-Mg – Série 5xxx. Normalmente é soldada facilmente sendo que ao possuir um teor de concentração abaixo de 2,5% de Mg, pode ocorrer fissuração a quente no período de solidificação caso o metal de adição tenha a mesma composição química do metal base no processo de fusão a arco.
- 6) Liga Al-Mg-Si – Série 6xxx. Possui uma soldabilidade satisfatória, porém pode ocorrer uma perda de dureza na zona de solda, sendo necessário executar um tratamento térmico pós soldagem para a recuperação a resistência na zona termicamente afetada. Na realização de soldagem em chapas finas, com o aumento da velocidade de avanço é possível obter maior resistência mecânica, enquanto que em chapas grossas o aumento da resistência não é significativo.
- 7) Liga Al-Zn – Série 7xxx. No geral, a soldabilidade deixa muito a desejar através do processo de fusão a arco, assim como na liga Al-Cu, mas também possui algumas ligas soldáveis.

2.2 Soldagem GMAW

Segundo Marques, Modesi e Bracarense [39] a soldagem a arco com proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding – GMAW*) condiz com o processo da junção de peças metálicas através de um aquecimento com um arco elétrico entre o eletrodo metálico consumível e a peça a ser trabalhada. O gás ou a mistura de gases podem ser inertes ou ativos e tem a função de evitar a contaminação da atmosfera na região a ser soldada. Quando é utilizado o gás de proteção inerte ou uma mistura rica em gases inertes o processo é conhecido como MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos.

O processo de soldagem MIG/MAG consiste em um processo normalmente semiautomático, sendo alimentado por um arame eletrodo de forma mecânica através de um motor de alimentação e o soldador o responsável pela iniciação e interrupção do processo de soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta. O arco elétrico é mantido e garantida através da alimentação em velocidade constante do arame eletrodo, e o comprimento do arco mantido constante pelo próprio sistema.

Wainer, Brandi e Mello [40] citam as vantagens principais na realização da soldagem GMAW – MIG/MAG: “Processo versátil, facilmente adaptado para a soldagem automática, possibilidade de execução em várias posições, alta produtividade devido à alta velocidade de soldagem, elevada taxa de deposição devido à alta densidade de corrente na ponta do arame, pouca ou nenhuma formação de escória, deposição do metal de solda com baixo teor de hidrogênio, penetração uniforme de raiz e eletrodo alimentado de forma contínua”.

Porém o processo GMAW possui limitações e desvantagens em seu processo que segundo Wainer, Brandi e Mello [40] citam os seguintes pontos: velocidade de resfriamento maior por não haver escória (aumentando a ocorrência de trincas), grande emissão de raios ultravioleta, projeção de gotas de metal líquido durante a soldagem, dificuldade na realização do processo em locais de difícil acesso devido ao bocal estar próximo do metal base. Enquanto que Marques, Modesi e Bracarense [39] evidenciam a sensibilidade quanto à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem

e à necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros para obter as características desejadas do cordão de solda como as principais limitações da soldagem MIG/MAG.

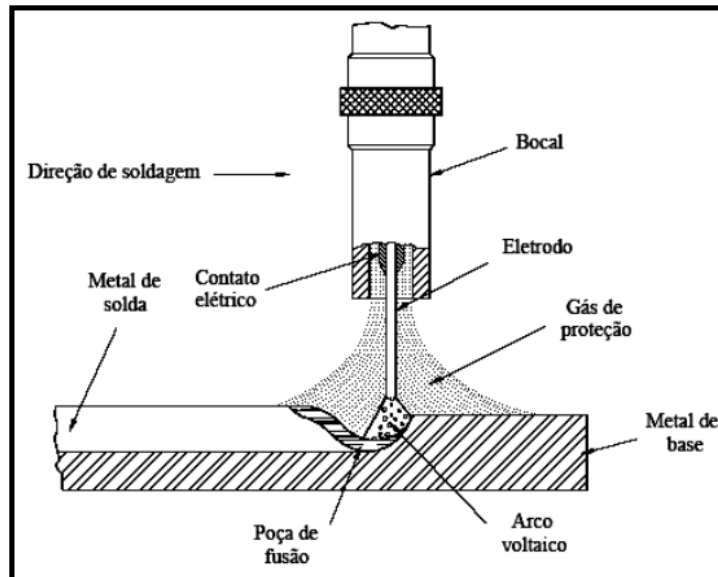


Figura 1 – Soldagem GMAW [41].

Geralmente a soldagem em ligas de alumínio por meio de GMAW ocorre em corrente contínua com polaridade positiva (CC^+ , onde o arame de deposição está ligado a polaridade positiva e a peça base ligada a polaridade negativa), sendo distinguida entre a soldagem semiautomática, em que a alimentação do arame é automática e a tocha é deslocada manualmente, e automática, onde ambos os movimentos são automáticos. O processo GMAW robotizado é muito utilizado industrialmente devido às altas velocidades de soldagem que geralmente vão de 8,33 a 16,66 mm/s e por manter os parâmetros de soldagem em nível constante [36, 42, 41].

2.2.1 Modos de transferência metálica no processo GMAW

Basicamente, existem três modos básicos para a transferência metálica no processo de soldagem GMAW e dependem principalmente de qual gás de proteção será

utilizado, da corrente e tensão, do diâmetro e tipo do metal de adição, e do tipo do metal base. Sendo as transferências por curto circuito, globular e “spray” [44].

2.2.1.1 Transferência por curto-circuito

A transferência por curto-circuito ocorre quando a velocidade de alimentação do arame excede a taxa de fusão, ao encostar a ponta do arame na poça de fusão gerando uma gota metálica e então a gota é transferida para a poça de solda. Quando ocorre esse fenômeno em que a gota toca na poça de fusão, o sistema gera um curto-circuito, elevando a corrente muito rápido, ocorrendo uma atração da gota para a poça, como consequência da tensão superficial, e posteriormente o arco se restabelece, diminuindo a corrente de forma abrupta, exemplificado na Figura 2. Esse modo de transferência pode ser realizado em todas as posições de soldagem ou em chapas de espessura fina e ocorre em situação de baixos valores de tensão e corrente [42, 45, 46].

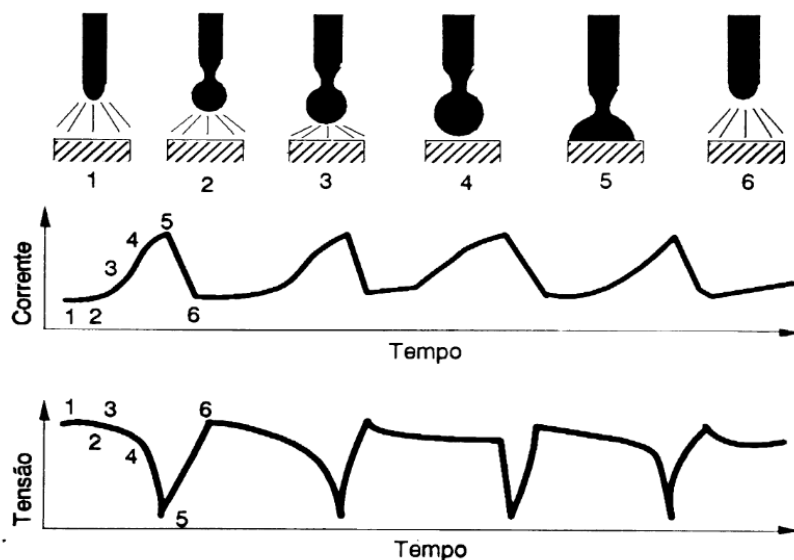


Figura 2 – Esquema da sequência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG [42].

2.2.1.2 Transferência globular

Segundo Biloni et al. [42], Póvoa [43], Marques [45] e Norrish e Richardson [46], a transferência globular ocorre quando os valores de tensão e corrente são intermediários, resultando em um arco de maior estabilidade se comparado com a transferência por curto-circuito. O diâmetro médio das gotas transferidas possui uma relação com a corrente de soldagem, tendendo a diminuir com a elevação da corrente. A gota globular de metal fundido eleva sua dimensão ao ponto de se separar do arame e indo em direção à poça de fusão por meio da gravidade. Devido a esse fenômeno, a deposição de grandes gotas e o fornecimento de baixo aporte térmico, resulta em uma soldagem com menor penetração.

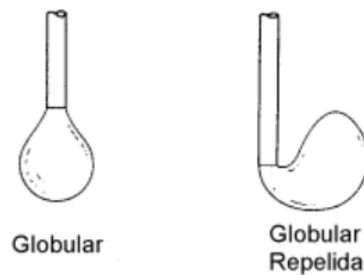


Figura 3 – Exemplificação de transferência globular e globular repelida [47].

A transferência globular tem como característica um elevado nível de respingos e devido as gotas serem transferidas por meio da força gravitacional, sua aplicação se limita apenas na soldagem plana. As velocidades de soldagem geralmente são muito baixas, até mesmo no caso de materiais de espessura fina. Em soldagem envolvendo alumínio, este modo de transferência é raramente empregado [42, 43].

Entretanto, segundo Biloni et al. [42], as fontes de soldagem eletrônicas têm tornado possível a utilização da transferência globular na soldagem em alumínio para espessuras finas (<3 mm), ou quando necessita controlar o aporte de energia com a vantagem de empregar baixas densidades de tensão e corrente.

2.2.1.3 Transferência goticular ou spray

Biloni et al. [42], Póvoa [43], Marques [45] e Norrish e Richardson [46], explicam que à medida que se eleva a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para o metal base diminui, até que acima de uma determinada faixa, ocorre a mudança no modo de transferência, passando de globular para goticular, demonstrado na Figura 4. A faixa da corrente em que ocorre esta mudança é denominada de corrente de transição. Na transferência goticular ou spray, as gotas do metal são extremamente pequenas, porém o número de gotas é elevado. O arco elétrico é bastante estável, a ocorrência de respingos é rara e o cordão é regular e suave. Geralmente, na soldagem em alumínio com este modo de transferência, é utilizado corrente contínua e o eletrodo com polaridade positiva.

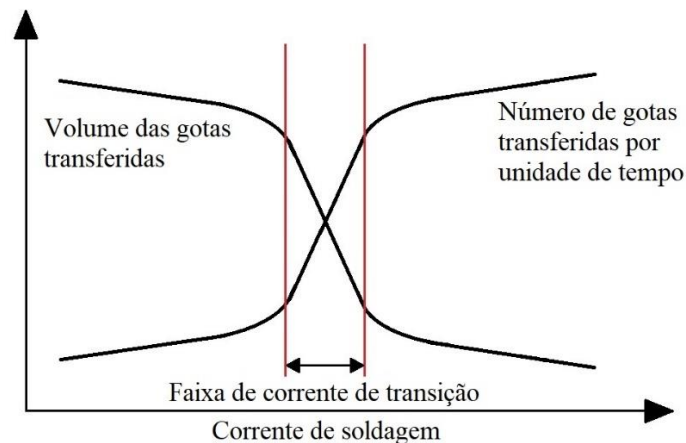


Figura 4 – Variação do diâmetro e do número de gotas transferidas por unidade de tempo com a corrente de soldagem [Adaptada de 45].

A Figura 4 demonstra que anteriormente à faixa de transição o volume das gotas formadas é grande e a frequência de transferência é baixa, sendo que ao elevar a corrente de soldagem sua variação não é relevante. Entre a faixa de transição observam-se variações bruscas e significativas, mostrando que com um leve aumento na corrente gera um grande aumento na frequência de transferência das gotas e uma queda brusca no

volume das gotas. Posteriormente à faixa de transição, as variações de corrente não têm impacto significativo.

Por ser um modo de transferência em que as forças de origem eletromagnéticas se sobrepõem às forças gravitacionais, teoricamente não há limitações em relação à posição de soldagem. Porém, como a realização deste tipo de transferência só é possível devido às altas correntes aplicadas, não se utiliza na soldagem de chapas de espessuras finas e a realização deste modo fora da posição plana pode ser problemática [46].

2.2.2 Variáveis do processo GMAW

As variáveis de soldagem consistem em fatores que são regulados permitindo controlar as características do cordão de solda. Conhecendo o efeito de cada variável a respeito das diversas características ou propriedades da solda, é possível obter resultados mais satisfatórios no processo.

Segundo Rafael Coraini [48], essas variáveis podem ser classificadas em três grupos para o processo de soldagem GMAW, sendo em variáveis pré-selecionadas, primárias e secundárias.

Variáveis pré-selecionadas, também denominadas de variáveis fixas, consistem no diâmetro e o tipo de arame utilizado, o tipo e a vazão do gás de proteção. Variáveis primárias, também conhecidas por parâmetros de soldagem, controlam o processo após a determinação das variáveis pré-selecionadas, sendo a tensão do arco, velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem.

2.2.3 Influência das variáveis de soldagem nas propriedades do cordão

A variável corrente elétrica é controlada através da velocidade de alimentação do arame, sendo que o aumento dessa velocidade gera em uma quantidade maior de material a ser fundido, necessitando de uma corrente maior que é ajustada pela fonte de soldagem.

A influência principal desta variável, consiste no controle da penetração da solda, sendo diretamente proporcional à corrente de soldagem, demonstrado na Figura 5.

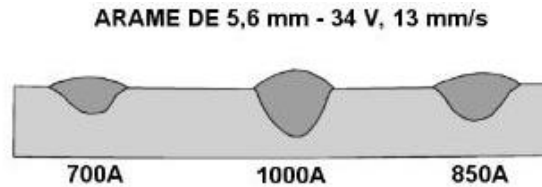


Figura 5 – Influência da corrente no formato do cordão de solda, em seção transversal, depositados por SAW em chapas de aço carbono [47].

A tensão de soldagem é a variável que controla o comprimento do arco elétrico na soldagem. A elevação da tensão no sistema gera uma altura e diâmetro maior do cone do arco. Conseqüentemente o aumento do arco, uma área maior do metal de solda é aquecida resultando em um cordão com dimensões maiores na largura e menores no reforço devido ao aumento de fluidez da poça de fusão. Essa variável é a principal a ser regulada para a largura do cordão de solda, conforme a Figura 6.

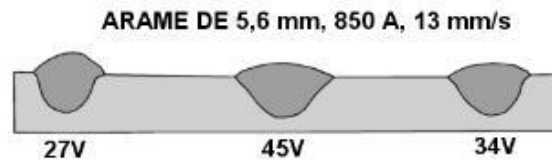


Figura 6 – Influência da tensão no formato do cordão de solda, em seção transversal, depositados por SAW em chapas de aço carbono [47].

A velocidade de avanço da tocha, também conhecida por velocidade de soldagem, possui efeitos similares à da tensão principalmente na penetração da solda como demonstrado na Figura 7.

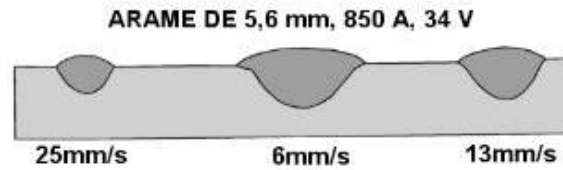


Figura 7 – Influência da velocidade de soldagem no formato do cordão de solda, em seção transversal, depositados por SAW em chapas de aço carbono [47].

Outro parâmetro que também exerce influência sobre a penetração da solda e largura do cordão é o ângulo de ataque da tocha. Utilizando a inclinação positiva (“puxando” a tocha), o arco elétrico atua diretamente na poça de fusão, aumentando a penetração. Enquanto que ao utilizar a inclinação no sentido negativo (“empurrando” a tocha), o arco elétrico se mantém sobre o metal de base frio, reduzindo a penetração, porém aumentando a largura do cordão, exemplificado na Figura 8.

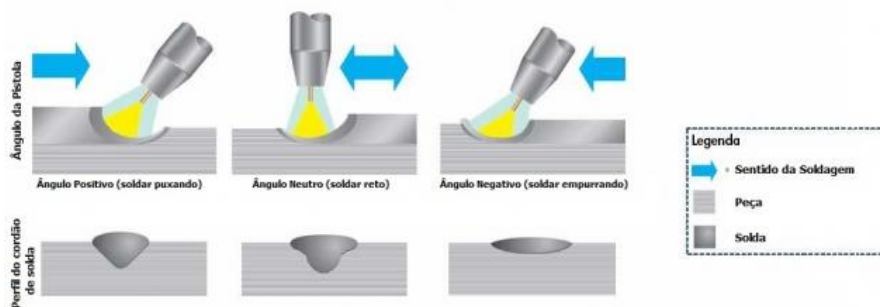


Figura 8 – Influência da posição da tocha e sentido de soldagem no formato do cordão de solda em seção transversal [49].

No processo de soldagem GMAW com alumínio, a tocha deve ser conduzida de forma que seja possível manter uma distância do bocal até a peça de 12 a 15 mm, devendo estar inclinada no sentido “empurrando”, com um ângulo de 5 a 15 ° com a vertical, melhorando a molhabilidade [36, 50].

A seleção do gás de proteção a ser utilizado é fundamental para a qualidade do cordão da solda. Devido às diferenças na condutividade térmica dos componentes do gás

de proteção, as características do depósito de solda se tornam diferentes. Sendo os gases com elevada condutividade térmica transferem mais calor para o metal base, influenciando na geometria e na penetração do cordão. Uma melhor transferência de calor para a peça, gera melhor penetração na junta e maior fluidez da poça de solda. Ao realizar a soldagem em metais altamente condutores como o alumínio e cobre, a alta condutividade térmica se torna crítica. Hélio e dióxido de carbono possuem condutividade térmica mais elevada do que a do argônio, transferindo calor facilmente para o metal base [51].

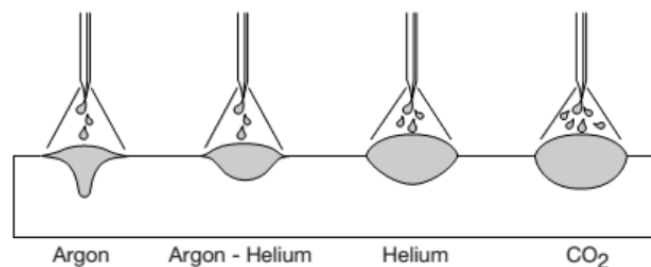


Figura 9 – Geometria e penetração do cordão utilizando diferentes gases [52].

Souza, Resende e Scotti [53] mostraram um estudo sobre a influência da polaridade negativa (CC^-) e positiva (CC^+) na geometria do cordão de solda, através da técnica de perfilografia que utiliza filmagem digital a alta velocidade e alto quadro por segundo, denominada de “Back-lighting”. A polaridade positiva é largamente mais utilizada para essas aplicações, devido à maior estabilidade do arco, menos respingos e à geração de geometrias adequadas nos cordões de solda.

2.2.4 Soldagem com arco pulsado

Com o intuito de controlar a transferência de material a cada intervalo de tempo a pulsação foi introduzida no âmbito da soldagem GMAW, tornando possível a

transferência de uma gota a cada pulso realizado através de uma baixa corrente média [54].

A soldagem GMAW pulsado tem sua principal característica a forma de onda descrita por quatro grandezas, demonstrada na Figura 10, onde corresponde I_p (corrente de pulso), t_p (tempo de pulso), I_b (corrente de base) e t_b (tempo de base), além de suas variáveis correspondentes para o oscilograma de tensão e corrente. Esses parâmetros devem ser considerados em conjunto com as variáveis tradicionais do processo GMAW [55].

Enquanto ocorre o tempo de pulso t_p , a corrente de pulso I_p é alta o suficiente para realizar o destacamento da gota devido ao efeito eletromagnético, sendo que a cada pulso destaca-se uma gota com o diâmetro igual ou inferior ao diâmetro do eletrodo. No tempo de base t_b , a corrente de base I_b mantém o arco aberto conservando o efeito de aquecimento de forma controlada, porém é insuficiente para a transferência de material.

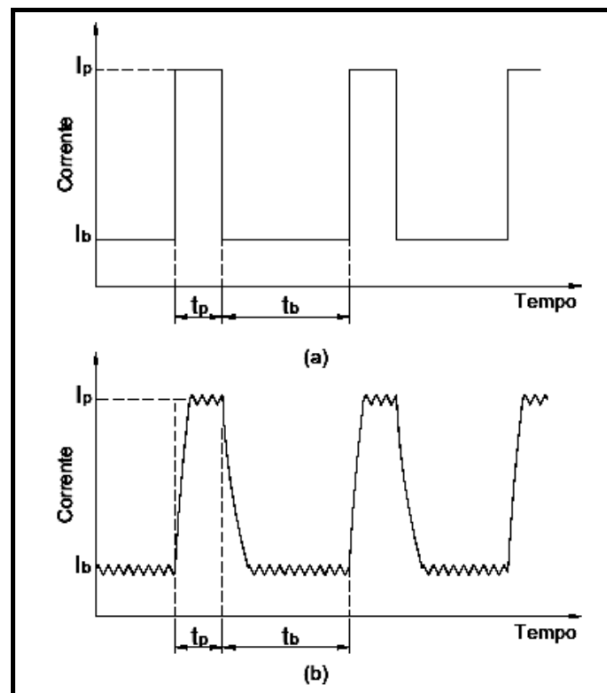


Figura 10 – Forma de onda da corrente no processo GMAW-P; (a) idealizado; (b) mais representativa para equipamentos comerciais [48].

O desenvolvimento da soldagem GMAW-P permitiu várias aplicações industriais, devido à corrente média poder ser inferior, a dimensão da poça de fusão pode ser controlada, podendo empregar este processo em trabalhos fora de posição [46, 56]. Através do modo pulsado, a frequência da transferência e a corrente média podem ser manipuladas para gerar uma gota menor, mais adequada em soldagem fora de posição do que em transferências no modo “spray” convencional com alta energia e a transferência no modo curto circuito convencional [57].

2.2.4.1 Curva característica pulsado

As curvas características e parâmetros da soldagem utilizando o modo Pulsado são representadas através da Figura 11.

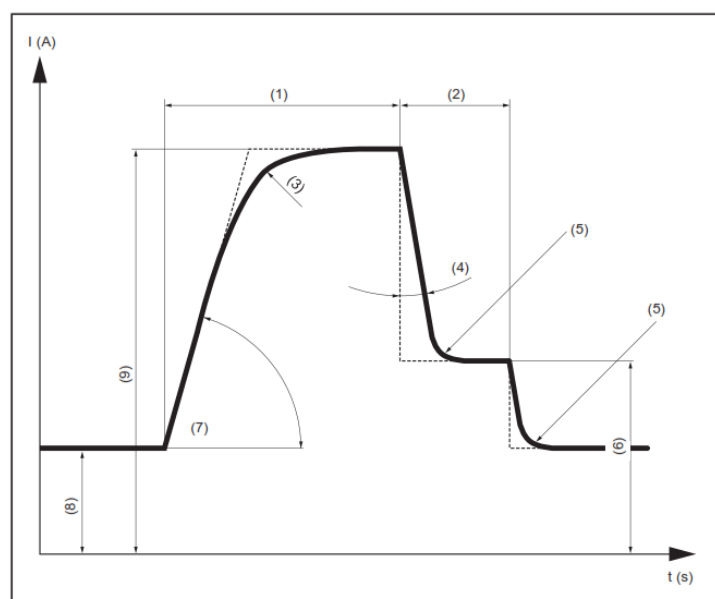


Figura 11 – Visão geral dos parâmetros-curvas características de pulsação [58].

(1) Tempo de corrente de pulsação

(2) Tempo de corrente da separação de gotas

- (3) Aumento de corrente
- (4) Queda de corrente – fim pulsação
- (5) Queda de corrente
- (6) Corrente separador de gotas
- (7) Aumento de corrente – início pulsação
- (8) Corrente básica
- (9) Corrente de pulsação

2.2.5 Soldagem CMT

Desenvolvida por Manfred Schorghuber pela empresa Fronius em 2005, o processo *Cold Metal Transfer* (CMT) é uma variação do processo de soldagem MIG/MAG, sendo seu principal diferencial e inovação o controle da movimentação do arame de deposição durante a transferência metálica e a sua integração no controle do processo de soldagem [59].

A soldagem em CMT é constituída de uma inovação no sistema de alimentação do fio integrado a um controlador digital de altas velocidades, permitindo, assim, um controle do arco elétrico e o seu principal diferencial que consiste no controle do método de transferência de material e a quantidade de entrega térmica transferida para o metal base. Enquanto que nos processos de transferência pulsada permitem o controle do arco elétrico durante o curto-circuito apenas eletricamente, a soldagem CMT controla a transferência de material assim como o início e a duração do curto circuito, alimentando de forma mecânica o arame à poça de fusão e afastando-o depois de um determinado tempo [60].

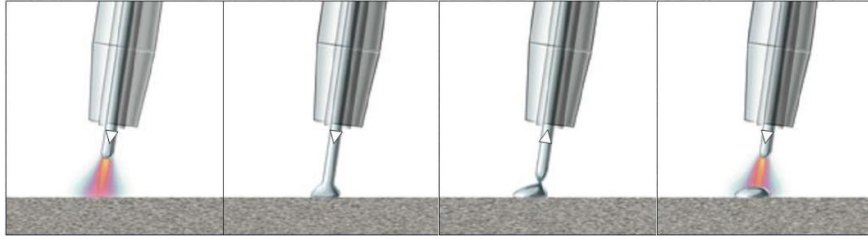


Figura 12 – Movimentação do arame no processo CMT [61].

O arame pode ter sua alimentação variando entre 1 Hz até 150 Hz, com a faixa de preferência adotada entre 30 Hz até 70 Hz, sendo as frequências mais baixas indicadas para situação com menos respingos pois a oscilação natural da poça de fusão é reduzida de forma significativa. Enquanto que a utilização de frequências mais elevadas gera uma oscilação maior na poça de fusão sendo recomendadas para elevar o preenchimento das juntas a serem soldadas [59].

A partir do movimento mecânico do arame incorporado ao controle elétrico, o ponto de curto circuito é detectado e a corrente pode ser reduzida, diminuindo a entrega térmica ao metal base [60].

As principais vantagens no processo de soldagem CMT consistem em [61]:

- Transferência de calor reduzida;
- Soldagem de baixa corrente de forma controlada;
- Capacidade de soldar chapas de espessura fina com pouca deformação;
- União de aço com alumínio;
- Processo com respingos quase nulo;

As desvantagens principais na soldagem CMT são [61]:

- Controle complexo dos parâmetros do processo;
- Sensibilidade às correntes de ar;
- Custo dos gases de proteção;
- Custo elevado dos equipamentos;

2.2.5.1 Curvas Características CMT

As curvas características e parâmetros da soldagem utilizando CMT são representadas através da Figura 13.

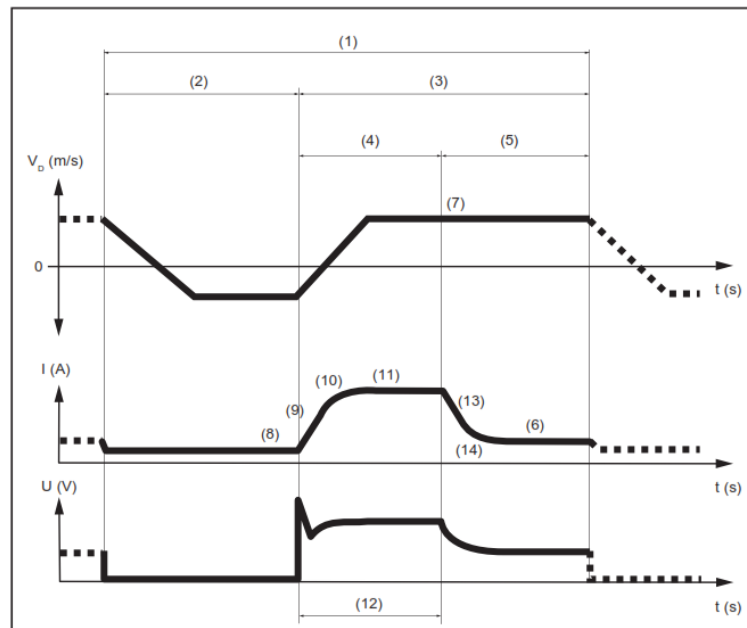


Figura 13 – Visão geral dos parâmetros-curvas características CMT [58].

(1) Tempo de ciclo CMT

(2) Fase de curto-circuito

(3) Fase de plasma

(4) Fase ascendente de força

(5) Fase de queima

(6) **I_{sc_wait}** – corrente após a fase de *Boost*.

(7) **vd_{sc_wait}** – velocidade do fio após a fase de *Boost* até a deposição da gota na poça de fusão.

- (8) I_{sc2} – corrente para o curto-circuito.
- (9) $d_{boostup}$ – aumento linear na corrente no início da fase de *Boost*.
- (10) $\tau_{boostup}$ – aumento não linear na corrente no início da fase de *Boost*.
- (11) I_{boost} – corrente durante a fase de *Boost*.
- (12) $t_{I_{boost}}$ – duração da fase de *Boost*.
- (8) $d_{boostdown}$ – decréscimo linear na corrente após a fase de *Boost*.
- (9) $\tau_{boostdown}$ – decréscimo não linear na corrente após a fase de *Boost*.

2.2.5.2 Curvas Características CMT+P

As curvas características e parâmetros da soldagem utilizando CMT+P, ou CMT Pulse são representadas através da Figura 14.

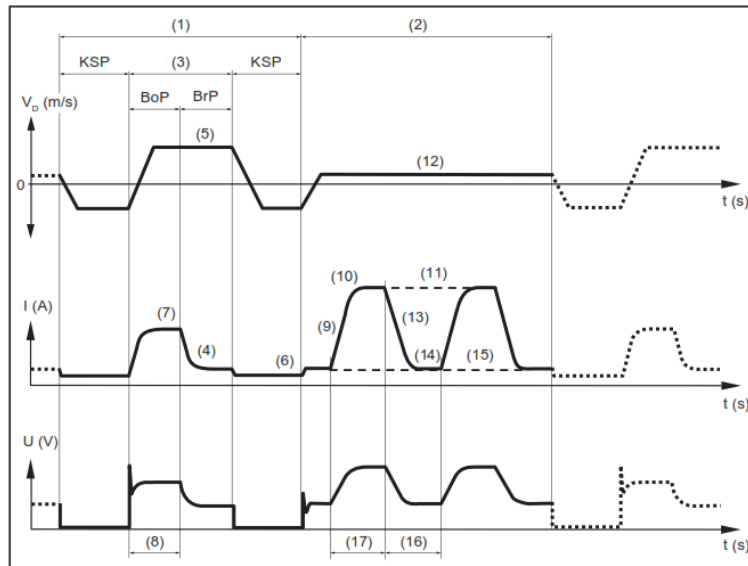


Figura 14 – Visão geral dos parâmetros-curvas características CMT+P [58].

KSP Fase de curto-circuito

BoP Fase ascendente de força

BrP Fase de queima

(1) Ciclo de CMT

(2) Ciclos de pulsação

(3) Fase de plasma

(4) **I_sc_wait** – corrente após a fase de *Boost*.

(5) **vd_sc_wait** – velocidade do fio após a fase de *Boost* até a deposição da gota na poça de fusão.

(6) **I_sc2** – corrente para o curto-circuito.

(7) **I_boost** – corrente para a fase de *Boost*.

(8) **t_I_boost** – duração da fase de *Boost*.

(9) **d_pulsup** – aumento linear da corrente pulsada.

(10) **t_pulsup** – aumento não linear da corrente pulsada.

(11) **I_p1** – corrente para a fase pulsada.

(12) **vd_pulscycle** – velocidade do fio para a fase pulsada.

(13) **d_pulswon** – decréscimo linear da corrente da corrente pulsada.

(14) **tau_pultdown** – decréscimo não linear da corrente da corrente pulsada.

(15) **I_base** – corrente para a fase de corrente base.

(16) **t_base** – duração da fase da corrente base.

(17) **t_p1** – duração da fase da corrente pulsada.

2.2.5.3 Componentes para a realização da soldagem CMT

Os principais componentes para realizar a soldadura robotizada, sendo possível realizar a soldagem pulsada e CMT são exemplificados na Figura 15.

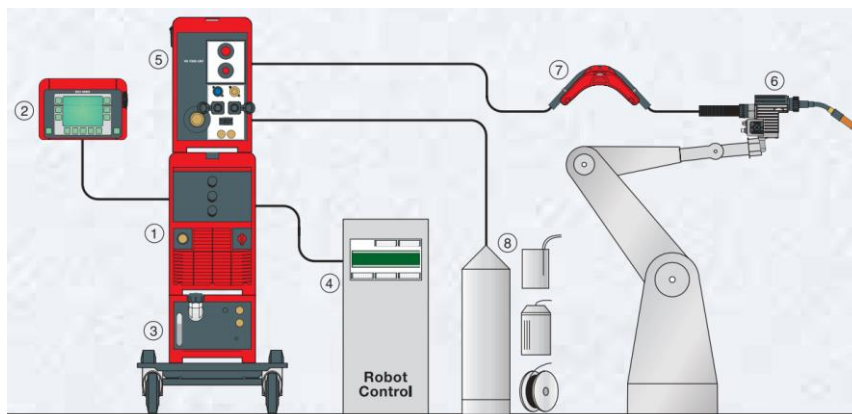


Figura 15 – Principais componentes para a realização de soldagem CMT [61].

1. Fonte de solda TPS 3200 / 4000 / 5000 CMT Fonte de solda inversora, totalmente digitalizada com comando micro processado e digitalmente regulado (320 / 400 / 500 A), com pacotes de funções integrados para o processo CMT.
2. Controle remoto RCU 5000i Unidade de controle remoto com Display de texto pleno, monitoramento de dados de soldagem com função Q-Master, interface de usuário amigável, estrutura de menu sistemático, gerenciamento de acesso.
3. Aparelho de refrigeração FK 4000 R Robusto e confiável, propicia uma refrigeração perfeita da tocha de solda com refrigeração à água.
4. Interface para robô Adequado para todos os robôs do mercado, independentemente se o comando é digital, analógico ou através de barramento de campo (FeldBus).
5. Alimentador do arame VR 7000 CMT Alimentador de arame regulado digitalmente para todas as bobinas de arame usuais.

6. Robacta Drive CMT Tocha de soldagem robotizada, compacta, com servo motor CA com regulação digital altamente dinâmico e isento de engrenagem. Para uma alimentação de arame precisa com pressão constante de roletes.
7. Buffer de arame Instalado entre os dois tracionadores de arame, desacopla um tracionador do outro, criando assim uma folga para o arame. Para a montagem preferencialmente com Balancim ou no terceiro eixo de robô.
8. Alimentação de arame.

2.3 Método Taguchi

O método de Taguchi, desenvolvido pelo engenheiro e estatístico Genichi Taguchi (Tokamachi, Japão, 1924-2012), se enquadra à categoria de métodos *off-line*, por serem utilizados exteriormente à linha de produção, sendo em contrapartida ao método *on-line* que são frequentemente mais utilizados, executando o controle durante a fase de produção.

Conhecida como DOE, *design of experiments*, a metodologia Taguchi tem como base a experiência prática, realizando diversos ensaios variando os parâmetros de entrada, para que seja possível obter uma matriz de resultados para os diferentes valores de entrada e em seguida realizar operações matemáticas e estatísticas, permitindo uma visualização melhor dos resultados permitindo retirar as conclusões.

Por se enquadrar em um método *off-line*, o planejamento de experiências requer um estudo e um conhecimento prévio do que se vai testar através dos parâmetros de entrada. Através desse método, não é necessário realizar todas as experiências possíveis com todos os parâmetros, permitindo que seja possível realizar apenas alguns dos testes conforme com o que é requerido e analisando estatisticamente os resultados. Sendo assim, é possível reduzir o tempo e o número total dos testes, conseqüentemente diminuindo o consumo dos recursos que seriam necessários para realizar todos os experimentos.

Inicialmente é necessário a escolha de n fatores com m níveis para que possa realizar um conjunto de testes e obter resultados diferentes para cada ensaio com diferente n e m . Segundo Taguchi, são utilizados 3 passos a seguir a metodologia geral DOE para a sua realização:

- Passo 1. Desenho do sistema: Esta fase busca compreender o problema em estudo, a tecnologia que será utilizada e os custos associados ao produto.
- Passo 2. Desenho paramétrico: Esta fase tem como objetivo elevar o desempenho do produto, minimizando a variabilidade dos resultados e otimizando os parâmetros do sistema.
- Passo 3. Desenho de tolerâncias: Esta fase enfatiza a realização de uma análise às tolerâncias do sistema afim de reduzir a variação. Verifica-se que com tolerâncias mais apertadas, a variabilidade do processo será reduzida e a qualidade se eleva. É necessário saber as consequências econômicas ao ter tolerâncias mais apertadas.

Uma metodologia é sugerida por Taguchi na realização dos testes, porém para cada tipo de estudo, é necessário analisar e adequar o método para que seja possível ter um melhor aproveitamento do método e dos resultados. Uma metodologia base para que seja possível apresentar um projeto robusto e enquadrar como um estudo aceitável é proposta por Phillip J. Ross [23] nos seguintes passos.

- Passo 1. Possuir um problema a ser resolvido. Compreender o problema e os fatores que englobam o sistema é essencial para que seja possível realizar um planejamento das experiências que serão realizadas. Ter consciência de que o problema em estudo pode indicar diversas soluções.
- Passo 2. Definir o objetivo desejado da experiência. Indicar as variáveis de saída e determinar o que se espera dos resultados. É importante saber como medir a performance dos resultados.
- Passo 3. Identificar os fatores que se aplica e influenciam nos resultados finais. Buscar a utilização do maior número de fatores influentes possível.
- Passo 4. Analisar os fatores escolhidos associando a sua influência no produto final e selecionar os que possuem maior importância. Separar em fatores de ruído e de controle.

- Passo 5. Estabelecer o número de níveis a serem testados e os valores a serem utilizados por cada nível em cada fator. Determinar o número de graus de liberdade inerente de cada fator. Recomenda-se que na primeira fase experimental seja realizado testes com mais fatores com menos grau de liberdade, elevando a precisão do projeto. Na segunda fase experimental, reduzir os números de fatores limitando para apenas os com maior influência, elevando os graus de liberdade.
- Passo 6. Identificar as interações entre os fatores. As interações aumentam os graus de liberdade de um problema, aumentando sua complexidade.
- Passo 7. Desenvolver um gráfico representativo com os fatores a controlar e a suas interações. Desenhar a matriz ortogonal que representa os testes práticos a serem realizados.
- Passo 8. Realizar a experiência prática e obter os resultados
- Passo 9. Analisar os resultados, efetuar as operações matemáticas necessárias, obtendo a razão sinal/ruído e em seguida a tabela ANOVA. Obter os gráficos que facilitem a indicar os fatores e parâmetros com maior significância para confirmar as análises efetuadas.
- Passo 10. Selecionar os níveis com maior influência sobre os fatores. Fatores com influência maior são os que necessitam serem controlados, fatores com menor influência podem ter um nível que reduza ao máximo os custos. Realizar um estudo de tolerâncias aceitáveis caso seja necessário para o projeto.
- Passo 11. Efetuar um ensaio experimental para que possa confirmar que estes fatores e níveis são os mais indicados segundo o produto e os resultados que se espera obter. Caso os resultados não se adequem com o esperado, deve-se retornar ao passo 3 e realizar a metodologia indicada novamente alterando os fatores escolhidos ou os valores atribuídos aos níveis de cada fator.

A partir dessa metodologia, é possível verificar que o principal objetivo do método Taguchi consiste em minimizar a variabilidade de um produto, definindo as soluções para que possa atingir uma maior robustez e reduzir os custos para o produtor e sociedade. A redução da variabilidade permite a determinação dos fatores que possuem uma influência maior na qualidade final do produto e obter um processo em que é possível produzir menos peças defeituosas.

2.3.1 Função Perda

A função perda consiste em um conceito relacionado à metodologia da qualidade de Taguchi, tendo em foco o impacto da variação da qualidade. Refletindo o desejo dos consumidores de terem produtos produzidos de uma maneira mais robusta e os produtores de elevar a produção com maior qualidade e preços menores, minimizando os gastos e as perdas para a sociedade. Por ser uma ferramenta passiva, não promove melhorias no processo e sim mais efeitos nos produtos diante de qualquer outro método individual [63].

A equação 1 demonstra essa função perda em forma de parábola que é dada por:

$$L = k(y - T)^2 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

L - Perda devido ao desvio da característica

y - Valor da característica de qualidade

T - Valor nominal ou valor alvo da característica de qualidade

k - Coeficiente de perda de qualidade

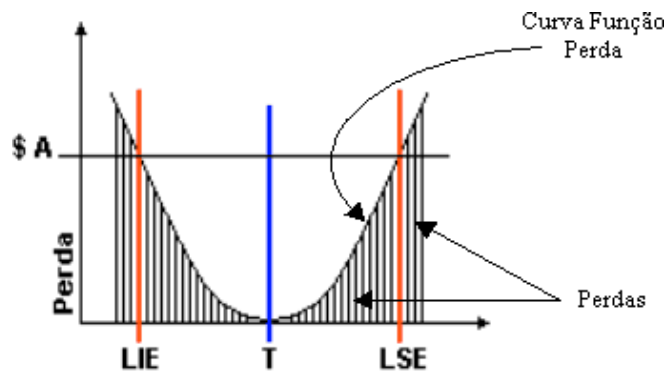


Figura 16 – Função Perda de Taguchi [64].

Onde:

LIE - Limite inferior das especificações

LSE - Limite superior das especificações

A Figura 16 apresenta a necessidade da produção de baixo custo e qualidade de forma simultânea pois abaixo de um valor determinado, a sociedade não consumirá o produto devido ao preço ser muito baixo para possuir alguma qualidade, enquanto que acima do valor determinado, o produto não será consumido devido ao preço elevado, mesmo que possua qualidade [23]. Essa metodologia consiste em encontrar valores limites aceitáveis permitindo a otimização dos custos globais da produção e do uso do produto realizado pela empresa, cliente e sociedade.

2.3.2 Razão sinal-ruído

Baseada na função perda, Taguchi desenvolveu diversos quocientes S/N, denominada de sinal-ruído, sugerindo o método para que a maximização desses quocientes constitua a via da minimização da função perda.

Segundo o suporte ao Minitab [65], há as seguintes maneiras de se efetuar os cálculos da razão sinal/ruído em um experimento Taguchi:

- Quanto maior melhor – O objetivo do experimento busca maximizar a resposta, sendo os dados positivos;

$$S/N_L = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

- Nominal é melhor – O objetivo do experimento busca criar uma resposta alvo e basear a razão sinal-ruído somente em desvios padrão, sendo os dados positivos, zero ou negativos;

$$S/N_t = -10 * \log(s_y^2) \quad \text{Equação (3)}$$

- Nominal é melhor (padrão) – O objetivo do experimento busca criar uma resposta alvo e basear a razão sinal-ruído em médias e desvios padrão, sendo os dados não negativos com um "zero absoluto" no qual o desvio padrão é zero quando a média é zero;

$$S/N_t = 10 * \log(s_y^2) \quad \text{Equação (4)}$$

A fórmula ajustada é:

$$S/N_t = 10 * \log\left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2}\right) \quad \text{Equação (5)}$$

- Quanto menor melhor – O objetivo do experimento busca minimizar a resposta, sendo os dados não negativos com um "zero absoluto" no qual o desvio padrão é zero quando a média é zero.

$$S/N_s = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

\bar{y} - Média dos dados observados;

s_y^2 - Variância de y;

n - Número de observações;

y_i - Dados observados.

2.3.3 ANOVA

Denominada de ANOVA ou análise de variância, é um recurso estatístico no qual é possível indicar os fatores que influenciam significativamente os parâmetros de entrada sobre as variáveis de saída ou resposta. O Valor F indica a influência de cada parâmetro em relação a resposta, sendo que quanto maior o valor de F, maior será o impacto na influência dos parâmetros sobre o resultado final. Enquanto que o Valor P demonstra a probabilidade de que determinado parâmetro influencie sobre a resposta, sendo o grau de certeza de que o parâmetro está influenciando os resultados. Para uma análise em que o parâmetro apresente uma influência significativa, geralmente utilizam-se valores de P igual ou inferior a 0,05 indicando uma confiabilidade igual ou superior a 95%. A confiabilidade pode ser calculada através da equação 7 [66].

$$c (\%) = 1 - \text{Valor de } P \quad \text{Equação (7)}$$

Capítulo III – Procedimento Experimental

3.1 Equipamentos

- Robô YASKAWA MOTOMAN MA2010 tipo YR-MA02010-A01, adquirido em junho de 2016, capacidade de carga útil de 10 kg, massa de 280 kg, com 6 graus de liberdade, número de série R16479-749-4, número de pedido S62N96-1-6, máxima pressão pneumática de 490 kPa, tensão de alimentação AC 400V trifásico, 50/60 Hz, e potência consumida de 2,0 kVA;
- Controlador YASKAWA DX200, adquirido em setembro de 2016, fonte de alimentação trifásica: 400/415/440 V, 50/60 Hz, potência consumida 2,0 kVA, corrente de carga total de 5,8 A, corrente de curto circuito 2,5 kA, desenho número 349854210, número de série 162017, tipo ERES-MA02010-E00, tipo do robô YR-MA02010-A00;
- Mesa móvel MOTOMAN MT1-250 S2CX, número da máquina 315128, fabricada em 2003-01, com 2 graus de liberdade e 250 kg;
- Fonte de Solda MIG/MAG FRONIUS TransPuls Synergic 4000 CMT R, número de série 28078438, em conjunto com um robô de avanço de arame VR 1550 4R/F++ Roboter, número de série 28096066, uma unidade de refrigeração FK4000 R FC com bomba centrífuga e sensor de fluxo com filtro de refrigerador, número de série 28096065, uma tocha de soldagem Robacta Drive CMT-PAP W, número de série 28096067 com bocal 34,0305,1974,630 Robacta 5000 36° OVT L=224 mm e H=86 mm.
- Suporte para fixação das peças na mesa;
- Chapa de cobre de 2 mm de espessura;
- Exaustor para fumos PEGAS P-001 MF- FILTER, número de série 201604429-2016 alimentação AC 230 V, 5,15 A, 50 Hz, 0,75 kW;
- Máscara de solda automática ANSI/ISEA Z87.1-2010;
- Escova de aço;

- Guilhotina hidráulica MINI 320, número 021854, ano 1988, pressão máxima de 250 bar;
- Luvas de poliéster preto para riscos mecânicos 688-NYN/N;
- Paquímetro;
- Régua;
- Máquina de corte de mesa Struers Labotom;
- Embutidora Struers LaboPress-1;
- Máquina de polir Struers LaboPol-25, tipo 05866327, número de série 5860001;
- Microscópio Veho VMS-005-LCD, ampliação digital de 1200x e ampliação ótica de 300x e *software* Veho PortableCapture Pro version 3.0.0.

3.2 Consumíveis

- Liga de alumínio Al 6082-T6 em barras de seção retangular 40x5 mm;
- Liga de alumínio Al 5754 em fio de 1 mm de diâmetro AlcoTec Wire Corporation;
- Argônio comprimido PRAXAIR;
- Disco de corte AKASEL Aka-Cut 500 HV 254x1,7x32 mm;
- Pó desmoldante;
- Resina fenólica (baquelite);
- Disco de papel abrasivo BUEHLER CarbiMet™ Grit [P240], Grit [P320], Grit [P600], Grit [P1000], Grit [P2500];
- Suspensão de polimento de Sílica Coloidal BUEHLER MasterMet™ 40-6370-064, pH 9,8, 0,06 µm;
- Solução de Osmond, composição: 10 ml de ácido clorídrico concentrado (HCl), 10 ml de ácido nítrico concentrado (HNO₃), 10 ml de ácido fluorídrico (HF), 25 ml de água destilada (H₂O).

3.3 Ensaaios Experimentais

Desenvolveu-se o trabalho ao longo do semestre letivo do ano 2016-2017, com a orientação dos professores doutores João Eduardo Pinto Castro Ribeiro e José Alexandre de Carvalho Gonçalves, e auxiliado com bolsеiros do projeto “Soldadura Robotizada de Estruturas Hiperestáticas de Alumínio”, Arlindo Pascoal e Eduardo Izeda, ambos mestres em engenharia industrial. Utilizou-se os equipamentos dos laboratórios de eletrotécnia (LE), tecnologia mecânica (LTE) e tecnologia térmica (LTT), localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), campus Santa Apolónia.

3.3.1 Considerações iniciais

Os principais objetivos deste trabalho foram, por um lado, o estudo da influência de alguns parâmetros de soldagem na qualidade de soldagem que foi controlada pela largura, penetração e reforço do cordão, por outro, pretendeu-se otimizar os parâmetros de modo a maximizar a qualidade de soldagem. Nesse sentido, realizou-se um ensaio clássico de soldagem equivalente à soldagem de revestimento. Foram efetuados diferentes ensaios, correspondendo a diferentes combinações de parâmetros e níveis, para cada combinação foram medidos os fatores de controle (largura, penetração e reforço).

3.3.2 Seleção dos parâmetros de soldagem

Os parâmetros foram selecionados com base nas recomendações da empresa Fronius e dos manuais do robô Yaskawa Motoman. Inicialmente, foram realizados pré-testes utilizando parâmetros constantes de corrente 130 A, tensão 19,8 V, velocidade alimentação 11 m/min e velocidade de avanço 15 m/min para o modo de transferência pulsado. Em contrapartida, para o modo de transferência CMT utilizou-se uma corrente de 98 A, uma tensão de 16,4 V, velocidade de alimentação de 8,3 m/min e velocidade de

avanço de 15 m/min. A distância da tocha à placa, ou comprimento do arco, recomendado encontra-se entre os 8 e os 12 mm. Contudo, é um parâmetro difícil de controlar devido diferentes fatores, nomeadamente, o posicionamento das placas e da mesa, as distorções durante a soldagem, bem como, à dilatação dos metais provocada pelo aumento de temperatura. Por essas razões, optou-se por garantir uma margem de segurança utilizando em todos os experimentos a distância máxima de 12 mm e, deste modo, evitou-se a colisão da ponta da tocha com as placas a soldar.

Os testes foram realizados em placas de 5 mm de espessura, a mesma espessura utilizada nas chapas dos ensaios, permitindo verificar o comportamento do experimento e os resultados da soldagem realizada, ajustando os valores dos parâmetros para obter a melhor escolha.

Após a realização dos testes preliminares, determinaram-se 12 parâmetros de soldagem, ou ajustes de processamento, com três níveis, para serem utilizados neste trabalho, atribuindo um número e uma letra (símbolo) para cada parâmetro afim de uma melhor visualização na utilização e cálculos futuros, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros e níveis selecionados para o modo Pulsado e CMT

Nº	Símbolo	Parâmetro	Faixa	Unidade	Níveis		
					1	2	3
1	A	Pré fluxo de gás	[0 – 9,9]	s	0,1	0,5	0,9
2	B	Pós fluxo de gás	[0 – 9,9]	s	0,5	1,5	3,0
3	C	Velocidade de alimentação	[1 – 22]	m/min	10,0	8,0	12,0
4	D	Correção anti-adesão	[-0,2 – 0 – 0,2]	s	-0,2	0	0,2
5	E	Valor nominal de gás	[off – 5 – 30]	l/min	15,0	5,0	25,0
6	F	Fator Gás	[Auto – 1 – 10]		Auto	5,0	10,0
7	G	Corrente inicial (Is)	[0 – 200]	%	120,0	90,0	140,0
8	H	Slope 1 (S11)	[0,1 – 9,9]	s	0,3	0,1	1,0
9	I	Corrente final (Ie)	[0 – 200]	%	70,0	50,0	100,0
10	J	Tempo inicial (ts)	[Desl – 0 – 9,9]	s	0,7	0,5	1,5
11	K	Tempo final (te)	[0,1 – 9,9]	s	0,2	0,5	1,0
12	L	Slope 2 (S12)	[0,1 – 9,9]	s	0,1	0,5	1,0

3.3.3 Seleção da matriz ortogonal Taguchi

Seguindo a metodologia Taguchi, verificou-se o número de graus de liberdade (*DOF – Degree of freedom*) para os experimentos a partir da equação 8.

$$DOF = (n_A - 1)(n_B - 1) \dots (n_n - 1) \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

DOF – Graus de liberdade

n_A – Número de níveis para o fator A

n_B – Números de níveis para o fator B

n_n – Número de níveis para o n fator

Sendo 12 parâmetros selecionados para este trabalho e 3 níveis para cada parâmetro, substituiu-se na equação 7.

$$DOF = 12(3 - 1) = 24$$

Obteve-se o número de 24 graus de liberdade, sendo a matriz L_{27} a mais recomendada para este estudo, com 27 ensaios, 12 parâmetros e 3 níveis. As interações entre os parâmetros não foram consideradas.

A partir da matriz ortogonal selecionada, ajustou-se a matriz aos 12 parâmetros selecionados necessitando eliminar uma coluna da matriz L_{27} . Devido as interações entre os parâmetros não serem consideradas, retirou-se a coluna 3 da matriz e substituíram-se os parâmetros e seus respectivos valores em cada nível obtendo a tabela do Anexo III.

Tabela 3 – Matriz ortogonal Taguchi L27.

$L_{27} (3^{13})$

NÚMERO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	2	3	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2
	a	b	a	a	c	a	a	b	a	a	b	a	a
			b	$\frac{b}{2}$		c	$\frac{c}{2}$	c	b	b^2	c^2	b^2	b
								c	c^2			c	c^2
GRUPO	1	2			3								

3.3.4 Preparação das placas

O fornecimento do material foi realizado através de barras de 40 mm de largura, 3 m de comprimento e 5 mm de espessura, sendo necessário efetuar cortes, recorrendo à Guilhotina hidráulica MINI 320, Figura 17, obtendo chapas de 40x320x5 mm.



Figura 17 – Guilhotina hidráulica MINI 320.

3.3.5 Fixação das chapas na mesa

Utilizaram-se os principais processos de fabricação (corte, esmerilhamento, conformação, furação e solda de ponto) disponíveis no laboratório de tecnologia mecânica, para o desenvolvimento do suporte de fixação (chapas de aço 1045). Fixou-se o gabarito na mesa, através de parafusos e roscas, posicionaram-se as chapas garantindo sua fixação plena, demonstrado na Figura 18, afim de evitar distorções e dilatações indesejadas durante o processo de soldagem.

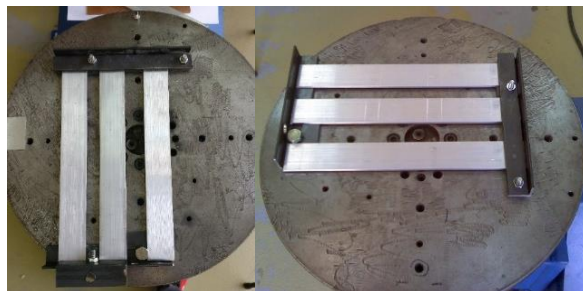


Figura 18 – Suporte de fixação das chapas na mesa do robô.

Optou-se pela utilização uma chapa de cobre, Figura 19, de 2 mm de espessura por abaixo das chapas a soldar, com o intuito de proteger a mesa de possíveis respingos e metal fundido, e permitir o contato direto com o alumínio buscando aumentar a área de contato e arrefecimento, diminuindo as distorções e dilatações indesejáveis que ocorrem durante a soldagem, um outro efeito importante foi o de encurtar o tempo de espera entre os ensaios de soldagem.



Figura 19 – Posicionamento da chapa de cobre utilizada.

3.3.6 Programação da trajetória do robô para a soldagem

A trajetória do Robô YASKAWA MOTOMAN MA2010 tipo YR-MA02010-A01 deve ser programada a partir do tipo de coordenada cartesiana que utiliza as referências dos vetores XYZ.

A programação da trajetória iniciou-se com a marcação de pontos no espaço e o modo de movimento que deve ser realizado entres os pontos, utilizando o controlador do robô. Em seguida, efetuou-se a sequência real que se deseja obter para que seja possível realizar a soldagem com essa trajetória determinada. Entre os diferentes modos de movimento possíveis de serem selecionados, utilizou-se os comandos MOVL, para realizar a trajetória entre dois pontos de forma linear, MOVJ, para realizar uma trajetória otimizada entre dois pontos de maneira que o robô efetue o movimento com o menor esforço mecânico e elétrico do sistema, e MOVC, para realizar a trajetória de forma circular ou semicircular, necessitando implementar um mínimo de três pontos para realizar este tipo de movimento.

A velocidade do movimento, em m/min, pode ser programada em 3 modos diferentes, sendo o modo em avanço rápido para deslocamentos rápidos, o modo em velocidade de aproximação para posicionamento de ferramentas e deslocamentos controlados ou precisos, e o modo em velocidade de avanço de soldadura para a realização da soldagem.

Para este trabalho, adotou-se a posição vertical do ângulo da tocha devido às propriedades desta posição influenciarem menos na geometria e penetração do cordão de solda.

A programação de deslocamento e soldagem escolhida para este trabalho está detalhada no Anexo II.

A partir da Tabela 2, inseriu-se os valores dos parâmetros de soldagem selecionados no *software* Fronius Xplorer e manteve-se as variáveis não selecionadas para este trabalho com os valores padrões (*default*) do próprio *software*, criando 27 programas distintos como demonstrado no Anexo III.

Na programação da trajetória e soldagem, é possível acionar o arquivo correspondente aos parâmetros que se deseja utilizar para a realização de determinado cordão de solda. Com base nesta ferramenta de programação, foram realizados 18 cordões de solda em 3 barras de alumínio, utilizando 6 parâmetros diferentes em cada bateria de soldagem, sendo o mesmo parâmetro para cada 3 cordões, como demonstrado na Figura 20. Agruparam-se os arquivos criados pelo *software* Fronius Xplorer na sequência que foram utilizados na programação do robô, iniciando com a sequência 1-6 seguindo, posteriormente, com as sequências 7-12; 13-18; 19-24 e, finalizando, com a sequência 25-27.



Figura 20 – Exemplificação da sequência dos programas utilizados em uma bateria de solda.

3.3.7 Realização da soldagem

O deslocamento realizado pelo robô inicia-se pela posição de segurança, previamente programada. Neste caso, na posição em que a tocha se encontra afastada da mesa de trabalho, tal como se pode ver na Figura 21.



Figura 21 – Sistema em posição de segurança.

A partir desta posição, utilizando deslocamento com avanço rápido, posicionou-se a tocha a 20 mm de distância, com referência ao eixo Z, na superfície da chapa no ponto A, Figura 22. Com a velocidade de aproximação, posicionou-se a ponta do arame encostando-a à chapa no ponto A, em seguida acionou-se a combinação de parâmetros número 1 e realizou-se a abertura do arco elétrico, iniciando a soldagem e deslocando a tocha, com a velocidade de avanço programada, até o ponto B. Encerrou-se o arco elétrico e aguardou um tempo pré-determinado de 5 segundos na mesma posição, em seguida deslocou-se a tocha até ao ponto C, ponto que se encontra a 20 mm de distância do ponto B, na direção paralela ao eixo Z. Deslocou-se através do avanço rápido até o ponto D, e com velocidade de aproximação até o ponto E encostando o arame na chapa de alumínio. Realizando o processo de soldagem e aguardando 5 segundos no ponto F. Levantou-se a tocha a 20 mm até o ponto G, deslocou-se até o ponto H e novamente com velocidade de aproximação posicionou-se até o ponto I para realizar a soldagem do cordão restante para esses parâmetros selecionados. Após realizar o processo de soldagem do último cordão, aguardou-se 5 segundos no ponto J, elevou-se a 20 mm de distância até o ponto K e posicionou-se através do avanço rápido no ponto L concluindo o ensaio dos 3 cordões de solda utilizando os parâmetros definidos número 1.

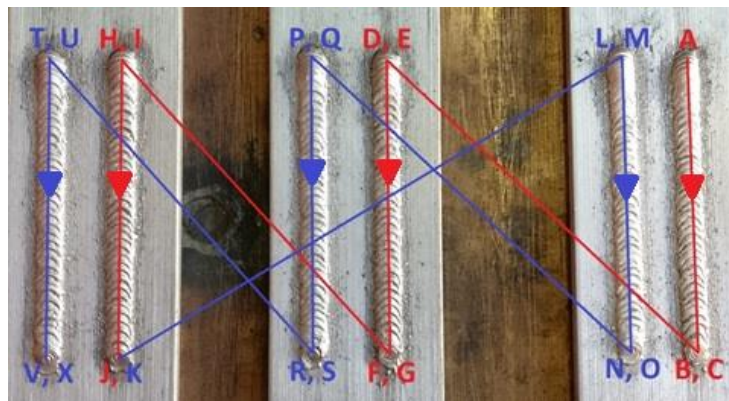


Figura 22 – Esquemática da trajetória de deslocamento e soldagem.

Estabeleceu-se um tempo de espera de 10 minutos permitindo o arrefecimento completo do sistema, diminuindo a influência da variação da temperatura no próximo cordão a ser realizado.

Durante estes 10 minutos de espera para realizar a próxima leva de 3 cordões, retiraram-se as partículas de sujidade resultantes do processo de soldagem. Para o efeito, utilizou-se uma escova de aço e um pano macio, deste modo, permitindo uma melhor visualização do cordão de solda e evitou-se que esses resíduos influenciem os resultados da próxima soldagem a ser realizada, como se pode visualizar na Figura 23.



Figura 23 – Região atingida pelos fumos e região após a limpeza dos resíduos.

Antes de realizar a próxima soldagem, cortou-se a ponta do arame para garantir a abertura do arco uniforme e, conseqüentemente, a deposição do metal adequada para os parâmetros utilizados e evitar possíveis respingos, ver Figura 24.



Figura 24 – Ponta do arame após a realização da soldagem.

Os programas foram realizados pela ordem apresentada na Figura 25, para o modo pulsado e CMT. Iniciando com o programa número 1 até ao 6, nas primeiras 3 chapas. A próxima sequência de soldagem iniciou-se no programa 7, realizando a soldagem na mesma posição em que o programa 1, em 3 novas chapas, até o programa 12, realizando na mesma posição do programa 6. Para a sequência de programas 13-18, 19-24 e 25-27 seguiu-se a mesma sequência de posições pré-determinadas.



Figura 25 – Sequência e posição dos cordões realizados na soldagem.

3.3.8 Corte dos cordões de solda

Posicionou-se a barra soldada na mesa de fixação da Máquina de corte (Struers Labotom), representada na Figura 26. Os cortes foram realizados com, aproximadamente, 10 mm de distância do centro até às extremidades do cordão de solda, obtendo amostras de 20 mm de comprimento.



Figura 26 – Máquina de corte de amostras.

Fixou-se firmemente a barra com ambas as morsas, na posição horizontal em relação a mesa, com o intuito de diminuir o contato do disco e a barra. Deste modo, diminui a geração de calor (temperaturas mais baixas) e reduzem as vibrações do sistema durante o corte. Como consequência, ocorre a diminuição de rebarbas e imperfeições provocadas por esses fenômenos e prolongando a vida útil do disco de corte.

Aplicando uma carga moderada no disco, realizaram-se os cortes das barras no sentido perpendicular à direção do cordão e, em seguida, realizaram-se novamente cortes separando a amostra em um único cordão. Assim, obtiveram-se 3 exemplares de cordão para cada programa realizado, como é visível na Figura 27.



Figura 27 – Cortes realizados nos cordões para a obtenção de amostras.

3.3.9 Embutimento do baquelite

Para evitar danificações e facilitar o manuseio, o polimento e a análise macrográfica, realizou-se o embutimento a quente das amostras em material termoplástico de baquelite.

Despejou-se o pó desmoldante nas faces inferior e superior do êmbolo da Embutidora Struers LaboPress-1, Figura 28. Devido ao contato com o baquelite, posicionaram-se as 3 amostras de cordões do mesmo programa com a face a ser analisada em contato com o êmbolo inferior da máquina, em seguida, baixou-se o êmbolo com o objetivo de diminuir as vibrações do sistema e, desta forma, evitar alterações de posição das amostras de alumínio durante a descida do êmbolo.



Figura 28 – Máquina Embutidora Struers LaboPress-1.

Segundo a Tabela 4, adicionou-se 5 medidas de baquelite, colocou-se o êmbolo superior na máquina, ligou-se o sistema mantendo uma temperatura de 180 °C e manteve-se durante 10 minutos entre as pressões de 130 a 140 kN/mm², adotando a conversão de unidades, para finalizar com o resfriamento de 5 minutos de espera, mantendo a mesma pressão.

Tabela 4 – Parâmetros para embutimento a quente, na prensa hidráulica [67].

Tipo de Plástico	Cor	N. ° de Medidas	Pressão (kgf/mm ²)	Tempo de Aquecimento (min)	Tempo de Resfriamento (min)
Baquelite	Preta	2 a 5	125 a 150	10	5

3.3.10 Lixamento

Devido à baixa rugosidade requerida no acabamento da amostra metalográfica, é essencial efetuar o lixamento para eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície, dando um acabamento com baixa rugosidade à superfície, preparando-a para o polimento.



Figura 29 – Máquina de polir Struers LaboPol-25.

Utilizou-se a Máquina de polir Struers LaboPol-25, Figura 29, com uma sequência de lixas disponíveis 240, 320, 600, 1000, 2500 através da técnica do lixamento, demonstrado na Figura 30, alternando o posicionamento da amostra em cada lixa em que será realizado, permitindo visualizar o sentido dos riscos realizados pela lixa para verificar que reste apenas os riscos da última lixa.

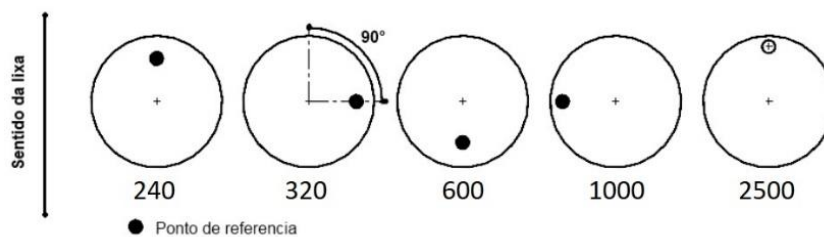


Figura 30 – Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados [Adaptada de 67].

3.3.11 Polimento

Para atingir uma qualidade superficial adequada para a análise metalográfica, é necessária a realização do polimento nas amostras. Iniciando-se com uma limpeza da superfície da amostra, deixando-a isenta de traços abrasivos, solvente e poeira, sendo aconselhável utilizar líquidos de baixo ponto de ebulição como o álcool etílico.

Após a realização da limpeza, selecionou-se um pano adequado para ser utilizado e, através do agente polidor de Sílica Coloidal, realizou-se o polimento na máquina, utilizando a técnica do lixamento, alternando o posicionamento da amostra para atingir uma qualidade superficial melhor.

3.3.12 Ataque químico

Para distinguir o metal de adição do metal base das amostras, permitindo a visualização da região atingida pelo processo de soldagem foi necessário efetuar um ataque químico à superfície da amostra. A solução utilizada para o ataque químico foi a de Osmond (Tabela 5) e que foi desenvolvida para as ligas de alumínio [67]. O processo do ataque químico das amostras iniciou-se pela sua secagem e posterior imersão da superfície a analisar, durante 30 segundos, na solução de Osmond. Após esse período, as amostras foram lavadas em água corrente.

Tabela 5 – Composição química da solução Osmond [67].

Reativo	Identificação	Composição (ml)
Osmond	Água destilada (H ₂ O)	25
	Ácido Clorídrico Concentrado (HCl)	10
	Ácido nítrico concentrado (HNO ₃)	10
	Ácido fluorídrico (HF)	10

3.3.13 Preparação do microscópico

O Microscópio Veho VMS-005-LCD, Figura 31, possui o *software* oficial Veho PortableCapture Pro em que torna possível a realização da calibração do nível de ampliação para efetuar as medições necessárias com maior acuidade.



Figura 31 – Microscópio Veho VMS-005-LCD.

Posicionou-se uma das amostras de baquelite na mesa do microscópio e ajustou-se a altura da mesa até atingir um foco adequado para a captura das imagens.



Figura 32 – Conjunto de amostras após o processo de ataque químico.

A calibração iniciou-se pela colocação de uma régua, com escala milimétrica, sobre a parte superior da amostra que se encontra suportada pela mesa do microscópio. Mediram-se as distâncias da escala da régua, realizando 4 medições reais, 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm. Introduziu-se os valores reais das medições no *software* e obteve-se um nível de ampliação de 17,7 vezes.

3.3.14 Medições

Após a calibração do microscópio, capturou-se uma imagem para cada cordão de solda na amostra, totalizando três imagens para cada amostra de baquelite, organizadas no Anexo I.

Através do *software* Veho PortableCapture Pro, realizaram-se as medições da largura (L), penetração (P) e reforço (R) dos cordões para cada amostra, como demonstrado na Figura 33. Organizaram-se os dados de medição, permitindo calcular os valores médios dimensionais de cada amostra.

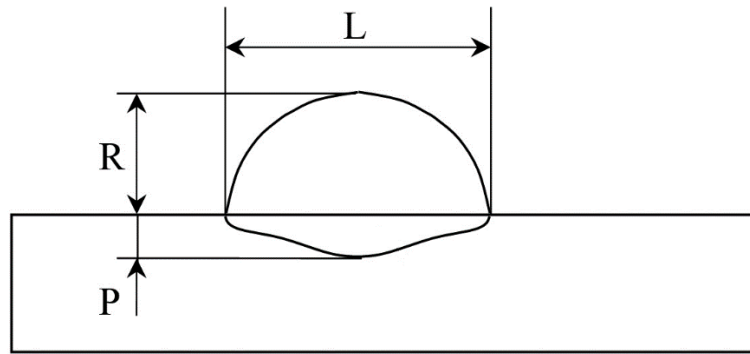


Figura 33 – Medições realizadas no cordão de solda [Adaptada de 68].

3.3.15 Cálculo razão sinal/ruído

Após efetuar todas as medições e, cujos valores, se encontram nas Tabela 6 e Tabela 7, calculou-se a razão sinal/ruído para a largura, reforço e penetração, para os dois de transferência em análise, Pulsado e CMT+P.

Para o cálculo da razão sinal/ruído da largura e penetração, utilizou-se a equação 3, em que nominal é melhor, criando uma resposta alvo. Enquanto que para o reforço, utilizou-se a equação 6, quanto menor melhor, minimizando a resposta.

Calcularam-se três médias para cada parâmetro, utilizando os valores da razão sinal/ruído envolvendo o mesmo nível de parâmetros, Anexo IV, tornando possível representar graficamente as curvas da razão sinal/ruído média para cada parâmetro.

3.3.16 Seleção da melhor combinação de parâmetros

A partir das curvas da razão sinal/ruído, selecionou-se o maior valor da razão sinal/ruído de cada um dos parâmetros obtendo a combinação ótima para largura, penetração e reforço, para os modos de transferência Pulsado e CMT+P.

Realizou-se o processo de soldagem para efetuar seis cordões de solda, utilizando essas novas combinações de parâmetros para, posteriormente, preparar as amostras em baquelite e efetuar as medições com o microscópio.

Ajustou-se a ampliação do microscópio em 15,63 vezes e mediu-se as seis amostras através do software. Os resultados das medições dos testes de confirmação estão demonstrados na Tabela 14 e Tabela 15.

Para calcular a razão S/N estimada ($\hat{\eta}$), utilizou-se a equação 9 [69]. Na medida total da razão S/N (η_m) foram substituídos pelas médias da razão sinal/ruído da Tabela 8 e Tabela 9. Na razão S/N média para o nível ótimo ($\bar{\eta}_i$) foram substituídos pelas razões S/N médias de maior valor para cada parâmetro, destacadas no Anexo IV.

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{t=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad \text{Equação (9)}$$

Sendo:

$\hat{\eta}$ – Razão S/N estimada

η_m – Medida total da razão S/N

$\bar{\eta}_i$ – Razão S/N média para o nível ótimo

q - Número dos principais parâmetros de projeto que afetam a característica de qualidade.

Com base nos resultados da razão S/N estimada, realizou-se uma comparação entre a razão S/N dos testes de confirmação, afim de verificar a melhoria obtida da razão sinal/ruído para atingir as dimensões ideais.

3.3.17 ANOVA

A partir dos dados obtidos de sinal/ruído, calculou-se a ANOVA para a largura, penetração e reforça, tanto para o modo pulsado como para o CMT, obtendo o Valor F e Valor P para, posteriormente, efetuar as análises de influência dos parâmetros.

Devido às amostras terem origem na região central do cordão de solda, retirou-se dos cálculos os parâmetros com características e propriedades da região final, afim de garantir melhores resultados, evidenciando quais parâmetros possuem maior influência na região em estudo.

Retirou-se da análise da ANOVA os seguintes parâmetros:

- Pós fluxo de gás – correspondente a letra B
- Corrente final – correspondente a letra I
- Tempo final – correspondente a letra K
- Slope 2 – correspondente a letra L

Obteve-se as tabelas ANOVA, sendo possível verificar através da soma dos quadrados (S_q), Valor F e Valor P, quais os parâmetros mais influentes, sua contribuição e confiabilidade, podendo realizar as discussões e conclusões do trabalho realizado.

Capítulo IV – Discussão de Resultados

4.1 Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições da largura, reforço e penetração do cordão de solda, para o modo pulsado e CMT, realizadas através do *software* Veho PortableCapture Pro, as tabelas resultantes dos cálculos da razão sinal/ruído através do método Taguchi para efetuar a seleção da melhor combinação de parâmetros, a melhoria necessária e os resultados da análise ANOVA.

4.1.1 Medidas dos cordões de solda

Utilizando o *software* Veho PortableCapture Pro para capturar as imagens do cordão em corte transversal, Anexo I, e realizar as medições para largura, penetração e reforço. Com base nessas medições, calculou-se a média das três medidas envolvidas em cada sequência de parâmetros para o modo Pulsado, Tabela 6, e para o modo CMT+P, Tabela 7.

A partir dos valores médios de cada ensaio realizado, fez-se uma representação gráfica para a largura, penetração e reforço, afim de uma melhor visualização dos dados obtidos da Tabela 6 e Tabela 7, permitindo uma comparação das medições em estudo para o processo de transferência Pulsado e CMT+P.

A partir do gráfico que envolve a largura média, Figura 34, verifica-se um comportamento muito diferente entre os dois modos, utilizando os mesmos parâmetros de soldagem no processo. É possível destacar que a região do gráfico entre o ensaio 7 e o ensaio 10, em que em ambos os processos utilizaram a mesma sequência de parâmetros, as dimensões da largura sofreram um comportamento semelhante, ocorrendo uma elevação da curva do ensaio número 7 para o 8, descendo para o ensaio número 9 e elevando-se, novamente, até o ensaio 10. Em outras regiões do gráfico verifica-se a semelhança da variação das dimensões, como do ensaio 22 ao 25, porém, ocorre uma particularidade que não controlou-se no ensaio 26 do modo Pulsado, que sofre uma variação muito alta na sua dimensão de largura, enquanto que no modo CMT+P não ocorreu essa elevação significativa.

Tabela 6 – Medidas obtidas das amostras utilizando modo Pulsado.

Nº	Largura (mm)				Penetração (mm)				Reforço (mm)			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
1	6,931	6,806	6,771	6,836	1,400	1,515	1,565	1,493	1,759	1,839	1,928	1,842
2	6,782	6,911	7,050	6,914	1,365	1,550	1,390	1,435	1,908	1,799	1,739	1,815
3	7,389	7,404	7,245	7,346	1,505	1,724	1,883	1,704	1,599	1,779	1,754	1,711
4	7,155	6,836	6,776	6,922	1,380	1,455	1,505	1,447	1,729	1,704	1,864	1,766
5	7,180	7,260	7,230	7,223	1,754	1,654	1,918	1,775	1,734	1,619	1,769	1,707
6	7,025	6,707	6,482	6,738	1,360	1,266	1,525	1,384	1,744	1,948	1,929	1,874
7	6,288	6,816	6,602	6,569	1,500	1,599	1,624	1,574	1,883	1,829	1,729	1,814
8	7,245	7,414	7,419	7,359	1,644	1,998	1,799	1,814	1,589	1,445	1,505	1,513
9	6,069	6,627	6,537	6,411	1,575	1,395	1,495	1,488	1,938	1,779	2,008	1,908
10	6,672	7,085	6,542	6,766	1,455	1,455	1,445	1,452	1,794	1,839	1,894	1,842
11	6,577	7,120	6,786	6,828	1,370	1,540	1,445	1,452	1,799	1,779	1,804	1,794
12	7,016	7,120	7,130	7,089	1,963	1,809	1,819	1,864	1,440	1,445	1,704	1,530
13	5,640	5,595	6,487	5,907	1,485	1,415	1,465	1,455	2,133	2,108	1,973	2,071
14	6,477	6,433	6,816	6,575	1,649	1,460	1,555	1,555	2,048	1,839	1,859	1,915
15	6,333	6,751	6,577	6,554	1,420	1,550	1,654	1,541	1,968	1,943	2,003	1,971
16	6,388	6,223	6,353	6,321	1,271	1,530	1,624	1,475	1,993	1,913	1,854	1,920
17	6,757	6,966	6,946	6,890	1,545	1,594	1,644	1,594	1,684	1,908	1,739	1,777
18	6,687	6,582	7,280	6,850	1,485	1,290	1,510	1,428	1,978	1,903	1,704	1,862
19	6,473	6,577	6,632	6,561	1,475	1,445	1,694	1,538	1,799	1,878	1,913	1,863
20	7,016	6,672	7,170	6,953	1,580	1,535	1,560	1,558	1,774	1,933	1,709	1,805
21	6,512	7,255	6,896	6,888	1,654	1,913	1,679	1,749	1,784	1,639	1,859	1,761
22	7,006	6,836	6,607	6,816	1,490	1,415	1,470	1,458	1,699	1,839	1,829	1,789
23	7,060	6,498	6,492	6,683	1,400	1,674	1,575	1,550	1,609	1,904	1,898	1,804
24	7,060	7,010	6,657	6,909	1,440	1,480	1,550	1,490	1,729	1,794	1,898	1,807
25	5,939	7,145	6,537	6,540	1,535	1,335	1,545	1,472	2,058	1,619	1,933	1,870
26	9,351	8,565	7,283	8,400	1,860	2,040	2,089	1,996	1,986	1,915	1,560	1,820
27	7,354	6,366	7,027	6,916	1,740	1,391	1,533	1,555	1,757	1,948	1,877	1,861

Tabela 7 – Medidas obtidas das amostras utilizando modo CMT+P.

Nº	Largura (mm)				Penetração (mm)				Reforço (mm)			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	1	2	3	Média
1	6,102	6,262	6,139	6,168	0,715	0,743	0,873	0,777	1,413	1,468	1,362	1,414
2	5,609	5,987	6,201	5,932	0,591	0,690	0,788	0,690	1,602	1,363	1,232	1,399
3	6,139	6,156	6,422	6,239	0,628	0,681	0,628	0,646	1,398	1,433	1,238	1,356
4	6,439	6,041	5,785	6,088	0,619	0,761	0,752	0,711	1,442	1,229	1,380	1,350
5	5,953	5,855	5,838	5,882	0,557	0,681	0,681	0,640	1,451	1,468	1,434	1,451
6	6,160	6,581	6,050	6,264	0,751	0,757	0,699	0,736	1,320	1,333	1,391	1,348
7	6,011	6,251	6,186	6,149	0,634	0,718	0,822	0,725	1,346	1,327	1,288	1,320
8	6,749	6,270	6,743	6,587	0,828	0,725	0,634	0,729	1,534	1,398	1,462	1,465
9	6,057	5,895	6,555	6,169	0,692	0,764	0,608	0,688	1,340	1,352	1,288	1,327
10	6,439	6,572	6,121	6,377	0,645	0,761	0,593	0,666	1,486	1,194	1,469	1,383
11	5,934	5,636	5,397	5,656	0,666	0,641	0,660	0,656	1,327	1,314	1,262	1,301
12	6,348	6,218	6,466	6,344	0,964	0,761	0,911	0,879	1,314	1,520	1,203	1,346
13	5,798	6,024	6,070	5,964	0,446	0,705	0,654	0,602	1,398	1,365	1,307	1,357
14	6,024	6,437	6,366	6,276	0,753	0,682	0,672	0,702	1,291	1,586	1,382	1,420
15	5,882	6,038	6,037	5,986	0,815	0,712	0,777	0,768	1,333	1,411	1,294	1,346
16	5,947	6,238	5,940	6,042	0,738	0,634	0,745	0,706	1,404	1,308	1,327	1,346
17	5,966	6,497	5,947	6,137	0,705	0,712	1,113	0,843	1,359	1,294	1,346	1,333
18	5,941	5,934	6,050	5,975	0,660	0,815	0,731	0,735	1,404	1,372	1,340	1,372
19	6,542	5,927	5,986	6,152	0,608	0,647	0,789	0,681	1,657	1,262	1,339	1,419
20	5,960	6,083	6,563	6,202	0,744	0,544	0,563	0,617	1,21	1,437	1,456	1,368
21	5,908	6,238	6,277	6,141	0,589	0,822	0,757	0,723	1,430	1,417	1,333	1,393
22	6,659	5,940	6,665	6,421	0,621	0,615	0,595	0,610	1,443	1,430	1,378	1,417
23	6,173	5,856	6,257	6,095	0,738	0,673	0,725	0,712	1,346	1,566	1,404	1,439
24	6,264	6,523	6,879	6,555	0,576	0,634	0,699	0,636	1,553	1,398	1,236	1,396
25	6,309	6,225	6,089	6,208	0,946	0,673	0,673	0,764	1,165	1,456	1,437	1,353
26	6,206	6,393	6,173	6,257	0,686	0,867	0,569	0,707	1,475	1,307	1,424	1,402
27	6,232	6,646	5,850	6,243	0,849	0,692	0,725	0,755	1,352	1,456	1,301	1,370

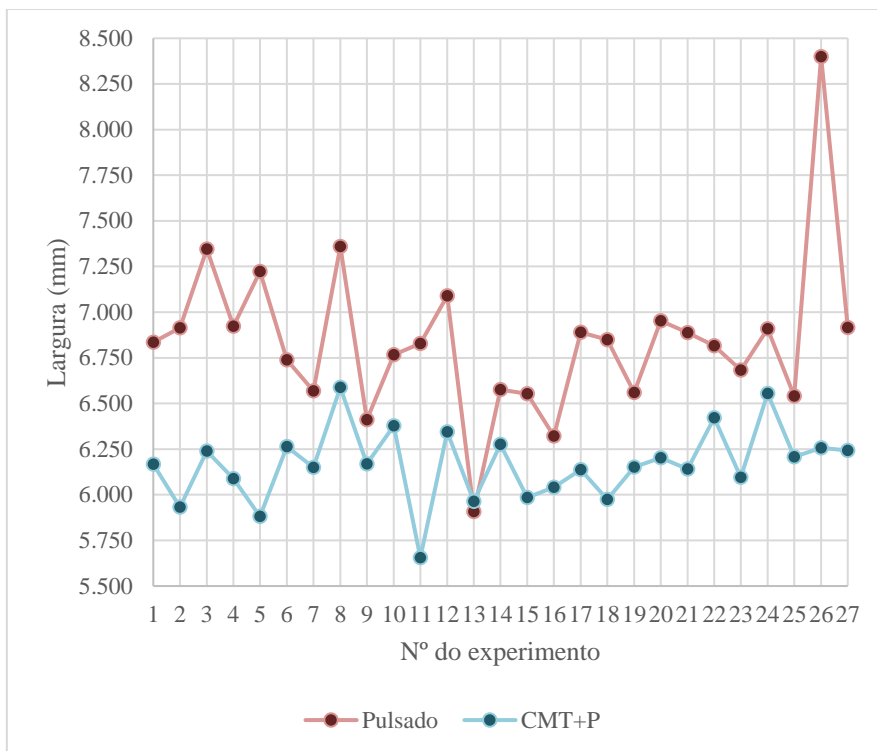


Figura 34 – Gráfico comparativo da largura média entre Pulsado e CMT+P.

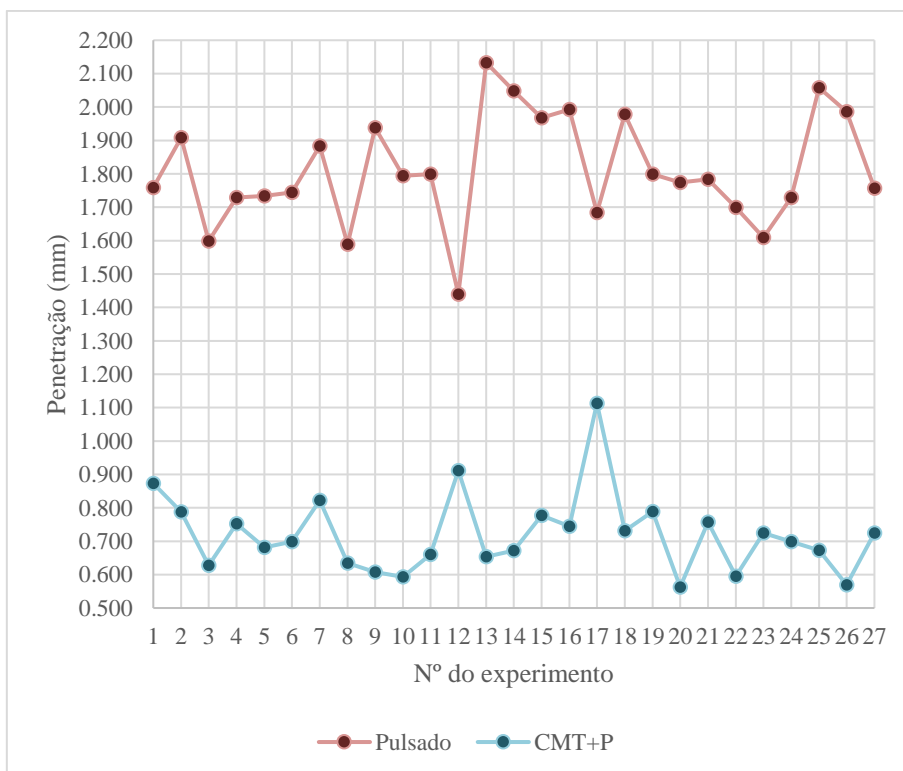


Figura 35 – Gráfico comparativo da penetração média entre Pulsado e CMT+P.

Com o desenvolvimento do gráfico da penetração média, Figura 35, é possível verificar que a escolha do processo Pulsado ou CMT+P influencia diretamente nas dimensões da penetração do cordão da solda, sendo o modo Pulsado com valores superiores de penetração. Tal como no gráfico da largura média, este gráfico possui regiões com as curvas semelhantes, destacando a região inicial entre o ensaio 2 ao 8, porém, nos demais ensaios, observa-se que as curvas se comportam de maneira muito diferente, apesar de utilizarem o mesmo conjunto de parâmetros.

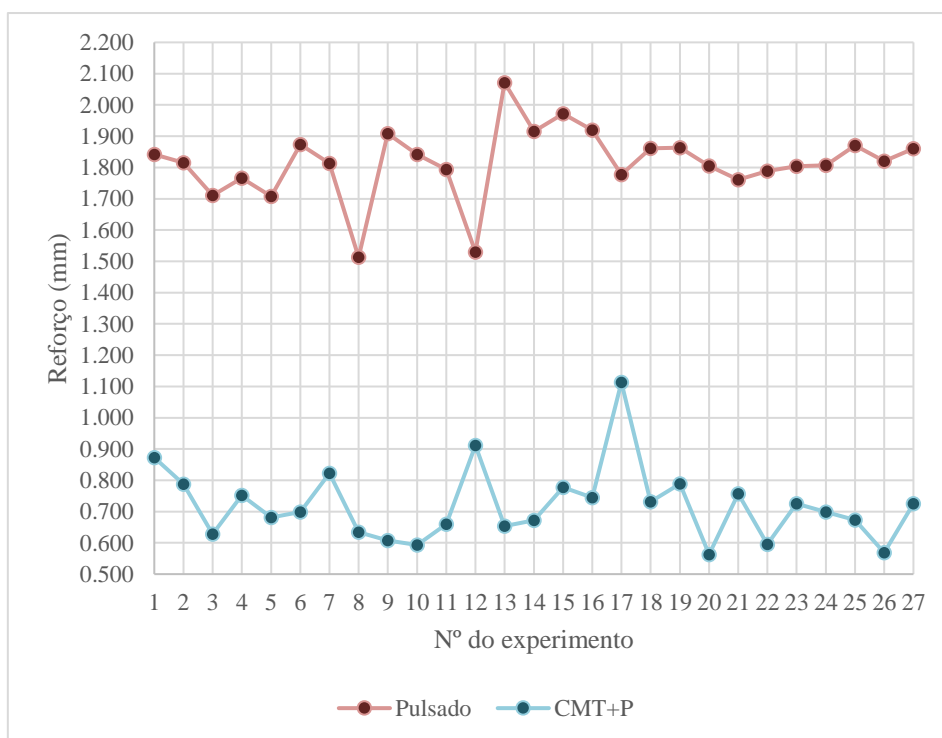


Figura 36 – Gráfico comparativo do reforço médio entre Pulsado e CMT+P.

O gráfico de reforço, Figura 36, médio também demonstra uma grande diferença de dimensões entre os processos de soldagem utilizando modo Pulsado e CMT+P, tendo o processo de CMT+P valores de reforço mais baixos. Assim como o gráfico de penetração média, o gráfico de reforço médio apresenta condições parecidas, com um comportamento inicial, na região entre o ensaio 1 e o ensaio 8, curvas semelhantes entre os modos de soldagem envolvidos. Os demais ensaios demonstram que,

independentemente, do modo de solda escolhido, as curvas se comportam de maneira diferente utilizando os mesmos parâmetros de soldagem.

4.1.2 Razão Sinal/ruído

Utilizando os dados obtidos através das medições da largura, penetração e reforço, demonstrado na Tabela 6 e Tabela 7, calculou-se a razão sinal/ruído para cada ensaio realizado e a média para cada tipo de medição.

A Tabela 8 apresenta os valores da razão sinal/ruído para cada ensaio realizado, utilizando os dados de largura, penetração e reforço para o modo Pulsado. A Tabela 9 apresenta os valores da razão sinal/ruído para cada ensaio realizado, utilizando os dados de largura, penetração e reforço para o modo CMT+P.

A partir dos dados obtidos na Tabela 8 e Tabela 9, calcularam-se três médias da razão sinal/ruído para cada parâmetro, utilizando os valores da razão sinal/ruído envolvendo o mesmo nível de parâmetros, demonstrado no Anexo IV. As curvas da razão sinal/ruído média para o modo Pulsado são apresentadas através da Figura 37 para a largura, Figura 38 para a penetração e Figura 39 para o reforço. Para o modo CMT+P, as curvas da razão sinal/ruído média são apresentadas através da Figura 40 para a largura, Figura 41 para a penetração e Figura 42 para o reforço.

Tabela 8 – Valores de sinal/ruído para o modo Pulsado.

Nº	Largura	Penetração	Reforço
	S/N_t (dB)	S/N_t (dB)	S/N_s (dB)
1	23,264	23,213	-5,312
2	19,217	21,728	-5,186
3	22,892	16,195	-4,673
4	15,580	25,786	-4,945
5	29,630	19,265	-4,652
6	13,043	19,408	-5,464
7	13,277	25,426	-5,177
8	21,844	16,779	-3,603
9	12,231	22,658	-5,624
10	12,709	46,532	-5,310
11	13,009	23,153	-5,077
12	25,756	23,054	-3,720
13	7,738	30,621	-6,330
14	15,334	22,252	-5,655
15	15,318	20,379	-5,896
16	22,977	16,521	-5,670
17	20,522	27,869	-5,006
18	10,249	20,145	-5,415
19	23,618	19,095	-5,409
20	13,631	34,699	-5,143
21	10,360	18,662	-4,925
22	15,731	29,976	-5,058
23	11,491	18,917	-5,148
24	14,926	26,847	-5,146
25	6,154	20,289	-5,479
26	1,388	20,135	-5,248
27	7,724	16,875	-5,401
Média	15,541	23,203	-5,173

Tabela 9 – Valores da razão sinal/ruído para o modo CMT+P.

Nº	Largura	Penetração	Reforço
	S/N_t (dB)	S/N_t (dB)	S/N_s (dB)
1	23,300	23,243	-3,015
2	12,225	21,892	-2,968
3	17,749	32,047	-2,664
4	11,402	23,752	-2,628
5	25,903	24,664	-3,234
6	12,809	31,686	-2,596
7	19,883	22,282	-2,415
8	12,979	22,020	-3,321
9	11,031	23,910	-2,457
10	14,461	23,070	-2,857
11	13,165	39,448	-2,288
12	19,889	21,313	-2,620
13	18,498	19,014	-2,653
14	14,880	28,860	-3,076
15	22,697	27,426	-2,587
16	17,149	25,890	-2,587
17	11,872	14,393	-2,499
18	25,496	23,965	-2,749
19	11,149	22,183	-3,104
20	11,695	20,902	-2,749
21	15,623	20,160	-2,885
22	9,361	39,081	-3,029
23	15,255	31,031	-3,177
24	11,968	25,979	-2,933
25	20,853	17,809	-2,666
26	20,276	18,231	-2,946
27	9,761	23,403	-2,742
Média	15,975	24,728	-2,794

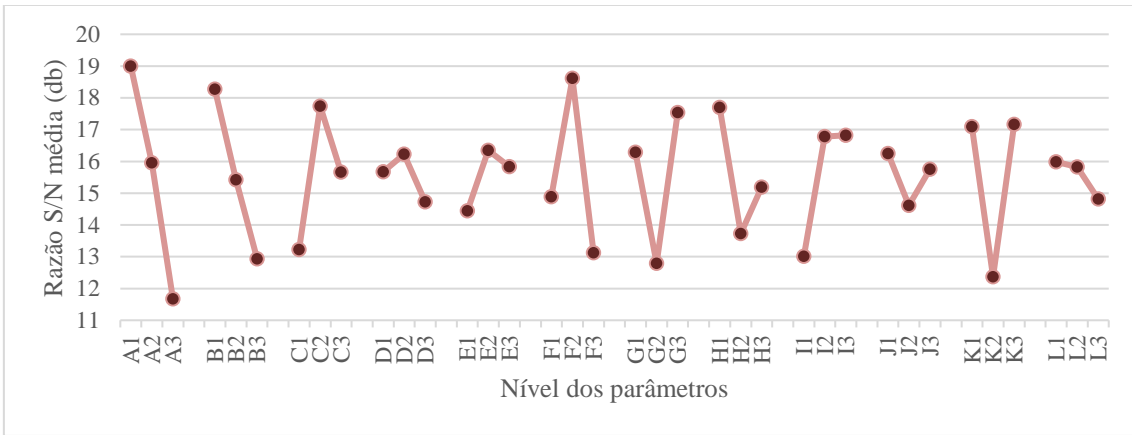


Figura 37 – Curvas da razão sinal/ruído média para largura no modo Pulsado.

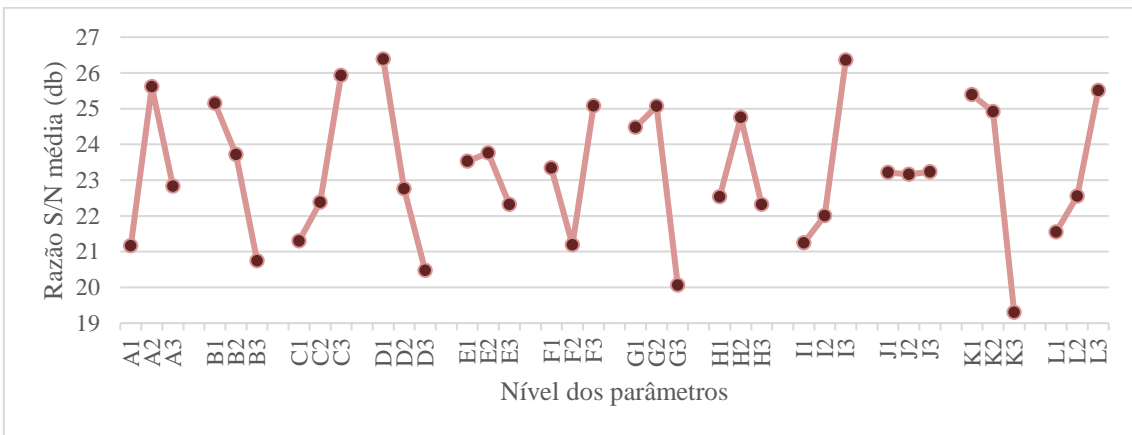


Figura 38 – Curvas da razão sinal/ruído média para penetração no modo Pulsado.

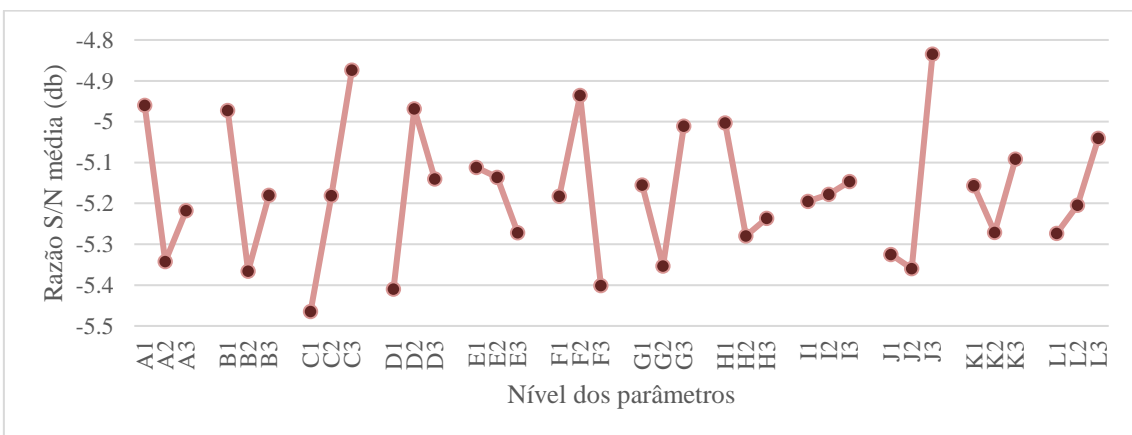


Figura 39 – Curvas da razão sinal/ruído média para reforço no modo Pulsado.

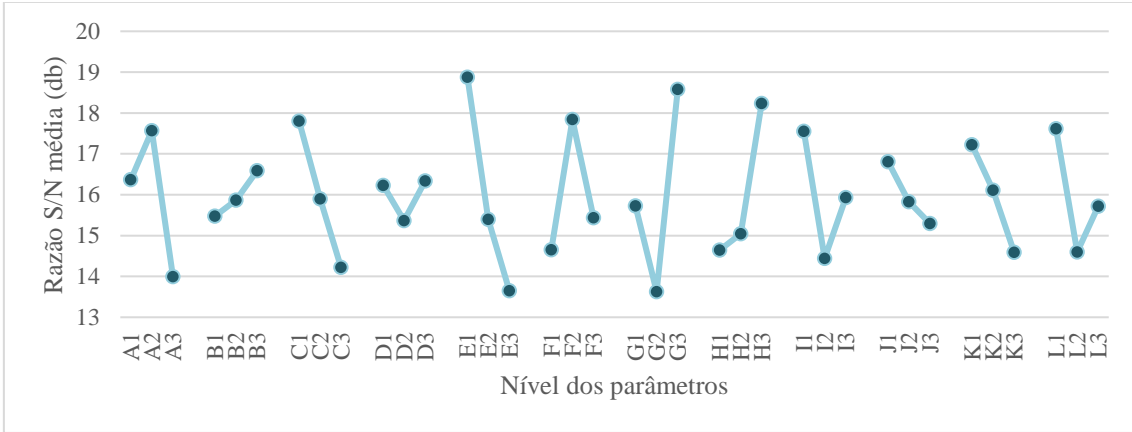


Figura 40 – Curvas da razão sinal/ruído média para largura no modo CMT+P.

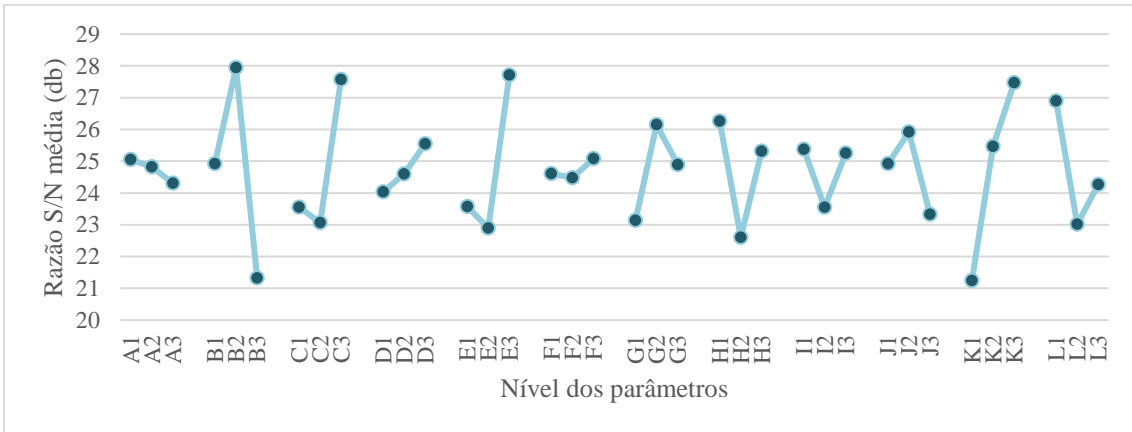


Figura 41 – Curvas da razão sinal/ruído média para penetração no modo CMT+P.

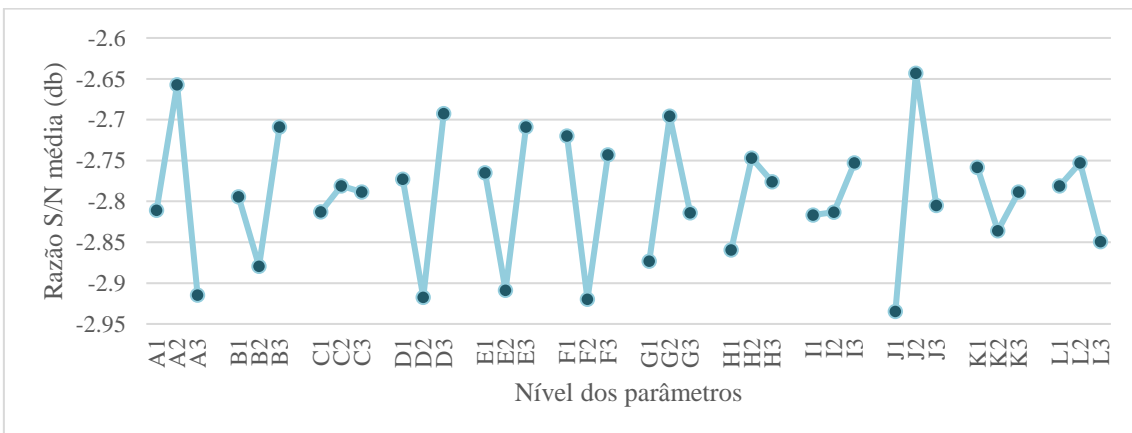


Figura 42 – Curvas da razão sinal/ruído média para reforço no modo CMT+P.

4.1.3 Seleção dos níveis adequados para o teste de confirmação

A partir das curvas da razão sinal/ruído, é possível verificar e selecionar os melhores parâmetros para a realização do teste de confirmação, sendo que os maiores valores da razão sinal/ruído representam as configurações de fatores de controle que minimizam os efeitos dos fatores de ruído.

Para realizar os testes de confirmação referentes ao modo Pulsado, foram selecionadas configurações para largura, penetração e reforço, obtendo as sequências demonstradas pela Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros e níveis selecionados para o teste de confirmação para o modo Pulsado.

Pulsado	Largura	Penetração	Reforço
Pré fluxo de gás	A1	A2	A1
Pós fluxo de gás	B1	B1	B1
Velocidade de alimentação	C2	C3	C3
Correção anti-adesão	D2	D1	D2
Valor nominal de gás	E2	E2	E1
Fator Gás	F2	F3	F2
Corrente inicial (Is)	G3	G2	G3
Slope 1 (S11)	H1	H2	H1
Corrente final (Ie)	I3	I3	I3
Tempo inicial (ts)	J1	J3	J3
Tempo final (te)	K3	K1	K3
Slope 2 (S12)	L1	L3	L3

Após selecionar a sequência mais adequada para cada dimensão em estudo, substituíram-se os parâmetros e os níveis, obtendo a Tabela 11, permitindo efetuar as mudanças da sequência de parâmetros, através do *software* Fronius Xplorer e realizar o processo de soldagem para obter os cordões de solda utilizando o modo Pulsado.

Tabela 11 – Valores dos parâmetros e níveis selecionados para o teste de confirmação para o modo Pulsado.

Pulsado	Faixa	Unidade	Largura	Penetração	Reforço
Pré fluxo de gás	[0 – 9,9]	s	0,1	0,5	0,1
Pós fluxo de gás	[0 – 9,9]	s	0,5	0,5	0,5
Velocidade de alimentação	[1 – 22]	m/min	8,0	12,0	12,0
Correção anti-adesão	[-0,2 – 0 – 0,2]	s	0,0	-0,2	0,0
Valor nominal de gás	[off – 5 – 30]	l/min	5,0	5,0	15,0
Fator Gás	[Auto – 1 – 10]		5,0	10,0	5,0
Corrente inicial (Is)	[0 – 200]	%	140,0	90,0	140,0
Slope 1 (S11)	[0,1 – 9,9]	s	0,3	0,1	0,3
Corrente final (Ie)	[0 – 200]	%	100,0	100,0	100,0
Tempo inicial (ts)	[Desl – 0 – 9,9]	s	0,7	1,5	1,5
Tempo final (te)	[0,1 – 9,9]	s	1,0	0,2	1,0
Slope 2 (S12)	[0,1 – 9,9]	s	0,1	1,0	1,0

Para o modo CMT+P, os níveis selecionados são demonstrados na Tabela 12 a partir das curvas de sinal/ruído obtendo a sequência adequada para as dimensões.

Tabela 12 – Parâmetros e níveis selecionados para o teste de confirmação para o modo CMT+P.

CMT+P	Largura	Penetração	Reforço
Pré fluxo de gás	A2	A1	A2
Pós fluxo de gás	B3	B2	B3
Velocidade de alimentação	C1	C3	C2
Correção anti-adesão	D3	D3	D3
Valor nominal de gás	E1	E3	E3
Fator Gás	F2	F3	F1
Corrente inicial (Is)	G3	G2	G2
Slope 1 (S11)	H3	H1	H2
Corrente final (Ie)	I1	I1	I3
Tempo inicial (ts)	J1	J2	J2
Tempo final (te)	K1	K3	K1
Slope 2 (S12)	L1	L1	L2

Substituindo os valores dos níveis para as sequências, obteve-se a Tabela 13, permitindo efetuar as mudanças da sequência de parâmetros, através do *software* Fronius

Xplorer e realizar o processo de soldagem para obter os cordões de solda utilizando o modo CMT+P.

Tabela 13 – Valores dos parâmetros e níveis selecionados para o teste de confirmação para o modo CMT+P.

CMT+P	Faixa	Unidade	Largura	Penetração	Reforço
Pré fluxo de gás	[0 – 9,9]	s	0,5	0,1	0,5
Pós fluxo de gás	[0 – 9,9]	s	3,0	1,5	3,0
Velocidade de alimentação	[1 – 22]	m/min	10,0	12,0	8,0
Correção anti-adesão	[-0,2 – 0 – 0,2]	s	0,2	0,2	0,2
Valor nominal de gás	[off – 5 – 30]	l/min	15,0	25,0	25,0
Fator Gás	[Auto – 1 – 10]		5,0	10,0	Auto
Corrente inicial (Is)	[0 – 200]	%	140,0	90,0	90,0
Slope 1 (S1)	[0,1 – 9,9]	s	1,0	0,3	0,1
Corrente final (Ie)	[0 – 200]	%	70,0	70,0	100,0
Tempo inicial (ts)	[Desl – 0 – 9,9]	s	0,7	0,5	0,5
Tempo final (te)	[0,1 – 9,9]	s	0,2	1,0	0,2
Slope 2 (S2)	[0,1 – 9,9]	s	0,1	0,1	0,5

4.1.4 Testes de confirmação

Após realizar todo o procedimento descrito na metodologia para a preparação das amostras do teste de confirmação, mediu-se através do microscópio e seu *software* as dimensões da largura, penetração e reforço para o modo Pulsado, apresentado na Tabela 14, e para o modo CMT+P, observável na Tabela 15.

Tabela 14 – Medições da amostra de teste de confirmação Pulsado.

Pulsado	Medições			Média
	1	2	3	
Largura (mm)	7,272	7,379	7,342	7,331
Penetração (mm)	1,700	1,682	1,745	1,709
Reforço (mm)	1,538	1,489	1,542	1,523

Tabela 15 – Medições da amostra de teste de confirmação CMT+P.

CMT+P	Medições			Média
	1	2	3	
Largura (mm)	6,555	6,196	6,297	6,349
Penetração (mm)	0,747	0,762	0,779	0,763
Reforço (mm)	1,376	1,405	1,388	1,390

A partir dos valores das dimensões do cordão de solda, calculou-se a razão S/N, a razão S/N estimada e determinou-se a melhoria necessária para que se possa atingir a maior razão sinal/ruído para cada dimensão analisada.

Tabela 16 – Razão S/N, S/N estimado, melhoria necessária do teste de confirmação do modo Pulsado.

Pulsado	S/N (dB)	S/N estimado (dB)	Melhoria necessária (dB)
Largura	27,058	36,710	9,652
Penetração	31,537	46,987	15,450
Reforço	-3,655	-3,045	0,610

Tabela 17 – Razão S/N, S/N estimado, melhoria necessária do teste de confirmação do modo CMT+P.

CMT+P	S/N (dB)	S/N estimado (dB)	Melhoria necessária (dB)
Largura	16,411	35,286	18,875
Penetração	37,673	44,984	7,311
Reforço	-2,859	-1,882	0,977

Observa-se na Tabela 16, que o maior valor da melhoria necessária para o modo Pulsado, está relacionado a dimensão de penetração, enquanto que para o modo CMT+P, Tabela 17, o maior valor da melhoria necessária está relacionado com a dimensão da largura do cordão de solda.

4.1.5 Análise ANOVA

A utilização da análise ANOVA para este estudo, que envolve a metodologia Taguchi, permite evidenciar os parâmetros com maior influência para a condição medida. Utilizou-se a ferramenta de análise do *software* estatístico Minitab 17 versão *trial*, um produto desenvolvido pela Quality Analysis Results®, para realizar os cálculos da ANOVA.

GDL representa os graus de liberdade, S_q a soma dos quadrados e Q_m o quadrado médio que é obtida dividindo a soma de quadrados pelos graus de liberdade correspondentes.

O Valor F é uma ferramenta estatística que permite comprovar quais os parâmetros com influência mais significativa na qualidade. O Valor P determina a probabilidade de que determinado parâmetro influencie sobre a resposta.

Os parâmetros com influência nas condições finais, pós fluxo de gás, corrente final, tempo final e slope 2 foram retirados dos cálculos da ANOVA para uma melhor visualização dos dados permitindo analisar os parâmetros que influenciam na região central do cordão de solda.

Tabela 18 – Resultados da análise ANOVA da largura para o modo Pulsado.

Fonte	GDL	S_q	Q_m	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	244,010	122,003	2,780	0,109	21,45
C	2	91,700	45,850	1,050	0,387	8,06
D	2	10,460	5,229	0,120	0,889	0,92
E	2	17,560	8,781	0,200	0,822	1,54
F	2	141,420	70,711	1,610	0,247	12,43
G	2	109,200	54,602	1,250	0,329	9,60
H	2	72,540	36,268	0,830	0,465	6,38
J	2	12,630	6,314	0,140	0,868	1,11
Erro	10	438,170	43,817			38,51
Total	26	1137,680				100,00

Para a análise da largura no modo Pulsado, evidencia-se o parâmetro A, correspondente ao pré fluxo do gás, como o de maior influência com 21,45% de contribuição e 89,1% de confiabilidade. Destaca-se também o parâmetro F, correspondente ao fator gás, como o de segunda maior influência com 12,43% de contribuição e 75,3% de confiabilidade.

Tabela 19 – Resultados da análise ANOVA da penetração para o modo Pulsado.

Fonte	GDL	S _q	Q _m	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	91,030	45,517	0,870	0,447	8,10
C	2	105,450	52,727	1,010	0,398	9,39
D	2	160,140	80,072	1,540	0,261	14,25
E	2	10,730	5,363	0,100	0,903	0,96
F	2	68,230	34,114	0,660	0,540	6,07
G	2	134,580	67,289	1,290	0,317	11,98
H	2	32,840	16,419	0,320	0,736	2,92
J	2	0,020	0,012	0,000	1,000	0,00
Erro	10	520,430	52,043			46,32
Total	26	1123,460				100,00

Para a análise da penetração no modo Pulsado, evidencia-se o parâmetro D, correspondente à correção anti-adesão, como o de maior influência com 14,25% de contribuição e 73,9% de confiabilidade. Destaca-se também o parâmetro G, correspondente à corrente inicial, como o de segunda maior influência com 11,98% de contribuição e 68,3% de confiabilidade.

Tabela 20 – Resultados da análise ANOVA do reforço para o modo Pulsado.

Fonte	GDL	S _q	Q _m	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	0,685	0,342	2,360	0,145	8,36
C	2	1,572	0,786	5,410	0,026	19,19
D	2	0,890	0,445	3,060	0,092	10,85
E	2	0,134	0,067	0,460	0,643	1,64
F	2	0,978	0,489	3,370	0,076	11,93
G	2	0,531	0,265	1,830	0,211	6,48
H	2	0,399	0,199	1,370	0,297	4,87
J	2	1,554	0,777	5,350	0,026	18,97
Erro	10	1,452	0,145			17,72
Total	26	8,194				100,00

Para a análise do reforço no modo Pulsado, evidencia-se o parâmetro C, correspondente à velocidade de alimentação, como o de maior influência com 19,19% de contribuição e 97,4% de confiabilidade. Destaca-se também o parâmetro J, correspondente ao tempo inicial, como o de segunda maior influência com 18,97% de contribuição e 97,4% de confiabilidade.

Tabela 21 – Resultados da análise ANOVA da largura para o modo CMT+P.

Fonte	GDL	S _q	Q _m	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	59,530	29,765	2,320	0,149	9,61
C	2	57,846	28,923	2,250	0,156	9,34
D	2	5,141	2,570	0,200	0,822	0,83
E	2	127,384	63,692	4,960	0,032	20,57
F	2	49,684	24,842	1,930	0,195	8,02
G	2	111,111	55,555	4,330	0,044	17,95
H	2	69,470	34,735	2,700	0,115	11,22
J	2	10,550	5,275	0,410	0,674	1,70
Erro	10	128,426	12,843			20,74
Total	26	619,141				100,00

Para a análise da largura no modo CMT+P, evidencia-se o parâmetro E, correspondente ao valor nominal do gás, como o de maior influência com 20,57% de contribuição e 96,8% de confiabilidade. Destaca-se também o parâmetro G, correspondente à corrente inicial, como o de segunda maior influência com 17,95% de contribuição e 95,6% de confiabilidade.

Tabela 22 – Resultados da análise ANOVA da penetração para o modo CMT+P.

Fonte	GDL	S _q	Q _m	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	2,622	1,311	0,030	0,975	0,29
C	2	110,126	55,063	1,060	0,383	12,17
D	2	10,428	5,214	0,100	0,906	1,15
E	2	122,329	61,165	1,170	0,348	13,51
F	2	1,814	0,907	0,020	0,983	0,20
G	2	41,285	20,642	0,400	0,683	4,56
H	2	64,943	32,471	0,620	0,556	7,17
J	2	30,696	15,348	0,290	0,751	3,39
Erro	10	520,903	52,090			57,55
Total	26	905,146				100,00

Para a análise da largura no modo CMT+P, evidencia-se o parâmetro E, correspondente ao valor nominal do gás, como o de maior influência com 13,51% de contribuição e 65,2% de confiabilidade. Destaca-se também o parâmetro C, correspondente à velocidade de alimentação, como o de segunda maior influência com 12,17% de contribuição e 61,7% de confiabilidade.

Tabela 23 – Resultados da análise ANOVA do reforço para o modo CMT+P.

Fonte	GDL	S _q	Q _m	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
A	2	0,302	0,151	5,250	0,028	16,52
C	2	0,005	0,002	0,090	0,918	0,27
D	2	0,234	0,117	4,070	0,051	12,81
E	2	0,192	0,096	3,330	0,078	10,49
F	2	0,215	0,107	3,730	0,062	11,76
G	2	0,147	0,073	2,550	0,127	8,03
H	2	0,061	0,031	1,070	0,381	3,36
J	2	0,384	0,192	6,680	0,014	21,02
Erro	10	0,288	0,029			15,75
Total	26	1,827				100,00

Para a análise da largura no modo CMT+P, evidencia-se o parâmetro J, correspondente ao tempo inicial, como o de maior influência com 21,02% de contribuição e 98,6% de confiabilidade. Destaca-se também o parâmetro A, correspondente ao pré fluxo de gás, como o de segunda maior influência com 16,52% de contribuição e 97,2% de confiabilidade.

Capítulo V – Conclusões e Propostas para trabalhos futuros

5.1 Conclusões

A utilização do método Taguchi demonstrou uma grande relevância neste trabalho, concluindo o objetivo de obter as combinações ótimas de parâmetros de soldagem, para a largura, penetração e reforço do cordão de solda, no modo de transferência Pulsado e CMT+P. Este método de otimização, permitiu realizar o estudo com um número reduzido de ensaios, obtendo dados essenciais para verificar, através do teste de confirmação, o valor da melhoria necessária para atingir a razão S/N ideal de cada dimensão da geometria do cordão de solda, para o modo de transferência Pulsado e CMT+P.

A partir dos gráficos comparativos dos valores médios, Figura 34 para a largura, Figura 35 para a penetração e Figura 36 para o reforço, pôde-se verificar o comportamento ocasionado pela alteração da sequência de parâmetros nos dois modos de soldagem, Pulsado e CMT+P.

Os gráficos da razão sinal/ruído média, permitiram selecionar a sequência de parâmetros ótima para cada dimensão. Para o modo Pulsado, a combinação ótima para a largura consiste nos valores de 0,1 s de Pré fluxo de gás, 0,5 s de Pós fluxo de gás, 8 m/min de Velocidade de alimentação, 0 s de Correção anti-adesão, 5 l/min de Valor nominal de gás, 5 de Fator Gás, 140% de corrente inicial, 0,3 s de Slope 1, 100% de Corrente final, 0,7 s de Tempo inicial, 1 s de Tempo final e 0,1 s de Slope 2, correspondente à sequência A1B1C2D2E2F2G3H1I3J1K3L1. Para a penetração consiste nos valores de 0,5 s de Pré fluxo de gás, 0,5 s de Pós fluxo de gás, 12 m/min de Velocidade de alimentação, -0,2 s de Correção anti-adesão, 5 l/min de valor nominal de gás, 10 de Fator Gás, 90% de Corrente inicial, 0,1 s de Slope 1, 100% de Corrente final, 1,5 s de Tempo inicial, 0,2 s de Tempo final e 1 s de Slope 2, correspondente à sequência A2B1C3D1E2F3G2H2I3J3K1L3. Para o reforço consiste nos valores de 0,1 s de Pré fluxo de gás, 0,5 s de Pós fluxo de gás, 12 m/min de Velocidade de alimentação, 0 s de Correção anti-adesão, 15 l/min de Valor nominal de gás, 5 de Fator Gás, 140% de

Corrente inicial, 0,3 s de Slope 1, 100% de Corrente final, 1,5 s de Tempo inicial, 1 s de Tempo final e 1 s de Slope 2, correspondente à sequência A1B1C3D2E1F2G3H1I3J3K3L3.

Para o modo CMT+P, a combinação ótima para a largura consiste nos valores de 0,5 s de Pré fluxo de gás, 3 s de Pós fluxo de gás, 10 m/min de Velocidade de alimentação, 0,2 s de Correção anti-adesão, 15 l/min de Valor nominal de gás, 5 de Fator Gás, 140% de Corrente inicial, 1 s de Slope 1, 70% de Corrente final, 0,7 s de Tempo inicial, 0,2 s de Tempo final e 0,1 s de Slope 2, correspondente à sequência A2B3C1D3E1F2G3H3I1J1K1L1. Para a penetração consiste nos valores de 0,1 s de Pré fluxo de gás, 1,5 s de Pós fluxo de gás, 12 m/min de Velocidade de alimentação, 0,2 s de Correção anti-adesão, 25 l/min de Valor nominal de gás, 10 de Fator Gás, 90% de Corrente inicial, 0,3 s de Slope 1, 70% de Corrente final, 0,5 s de Tempo inicial, 1 s de Tempo final e 0,1 s de Slope 2, correspondente à sequência A1B2C3D3E3F3G2H1I1J2K3L1. Para o reforço consiste nos valores de 0,5 s de Pré fluxo de gás, 3 s de Pós fluxo de gás, 8 m/min de Velocidade de alimentação, 0,2 s de Correção anti-adesão, 25 l/min de Valor nominal de gás, auto de Fator Gás, 90% de Corrente inicial, 0,1 s de Slope 1, 100% de Corrente final, 0,5 s de Tempo inicial, 0,2 s de Tempo final e 0,5 s de Slope 2, correspondente à sequência A2B3C2D3E3F1G2H2I3J2K1L2.

A partir dos testes de confirmação realizados, obteve-se os valores da razão S/N e razão S/N ideal, verificando uma melhoria necessária de 9,652 dB para a largura, 15,450 dB para a penetração e 0,610 dB para o reforço para o modo Pulsado. Enquanto que para o modo CMT+P, verificou-se a melhoria necessária de 18,875 dB para a largura, 7,311 dB para a penetração e 0,977 dB para o reforço.

A análise ANOVA, permite demonstrar quais os parâmetros mais influentes e a sua contribuição para cada dimensão em estudo. Para a largura no modo Pulsado, verificou-se o parâmetro Pré fluxo de gás como o de maior influência com 21,45% de contribuição e Fator do gás como o de segunda maior influência com 12,43% de contribuição, para a penetração o parâmetro Correção anti-adesão como o de maior influência com 14,25% de contribuição e Corrente inicial como o de segunda maior influência com 11,98% de contribuição e para o reforço o parâmetro Velocidade de

alimentação como o de maior influência com 19,18% de contribuição e Tempo inicial como o de segunda maior influência com 18,96% de contribuição. Para a largura no modo CMT+P, verificou-se o parâmetro Valor nominal de gás como o de maior influência com 20,57% de contribuição e Corrente inicial como o de segunda maior influência com 17,95% de contribuição, para a penetração o parâmetro Valor nominal de gás como o de maior influência com 13,51% de contribuição e a Velocidade de alimentação como o de segunda maior influência com 12,17% de contribuição e para o reforço o parâmetro Tempo inicial como o de maior influência com 21,02% de contribuição e Pré fluxo de gás como o de segunda maior influência com 16,52% de contribuição.

5.2 Proposta para trabalhos futuros

Determinou-se a região central do cordão de solda para realizar os estudos, porém, a região inicial e final podem ser analisadas em trabalhos futuros devido à utilização e alteração dos parâmetros que influenciam essas regiões e por essas regiões estarem propensas à abertura e fechamento do arco elétrico.

A posição da tocha foi selecionada na posição normal e pode-se realizar outros ensaios com a posição de tocha empurrando ou puxando em trabalhos futuros, para selecionar em qual posição a geometria do cordão apresenta-se mais adequada para determinado estudo de solda.

Para este trabalho selecionou-se a soldagem de revestimento, afim de analisar o comportamento das dimensões em estudo, largura, penetração e reforço, com a utilização de diferentes sequências de parâmetros. Para trabalhos futuros, a utilização de outros tipos de juntas, como solda de topo (entre chapas com e sem chanfro, tubo-tubo), solda de filete (entre chapas perpendiculares e tubo-chapa) contribuiriam para aprimorar e verificar as dimensões dos cordões de solda, permitindo uma comparação entre os diferentes tipos de juntas.

Referências Bibliográficas

- [1] Holbery, J., & Houston, D. (2006). Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 58(11), 80-86.
- [2] Kulekci, M. K. (2008). Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9), 851-865.
- [3] Carle, D., & Blount, G. (1999). The suitability of aluminium as an alternative material for car bodies. *Materials & design*, 20(5), 267-272.
- [4] Cole, G. S., & Sherman, A. M. (1995). Light weight materials for automotive applications. *Materials characterization*, 35(1), 3-9.
- [5] Kulekci, M. K. (2008). Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9), 851-865.
- [6] Zah, R., Hischer, R., Leão, A. L., & Braun, I. (2007). Curauá fibers in the automobile industry—a sustainability assessment. *Journal of cleaner production*, 15(11-12), 1032-1040.
- [7] Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37-49.
- [8] Ferraris, S., & Volpone, L. M. (2005, October). Aluminium alloys in third millennium shipbuilding: materials, technologies, perspectives. In *The Fifth International Forum on Aluminium Ships, Tokyo, Japan*.
- [9] Skillingberg, M., & Green, J. (2007). Aluminum Applications in the rail industry. *LIGHT METAL AGE-CHICAGO-*, 65(5), 8.
- [10] Nayak, N. V. (2014). Composite materials in aerospace applications. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(9), 1-10.
- [11] Dursun, T., & Soutis, C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design*, 56, 862-871.

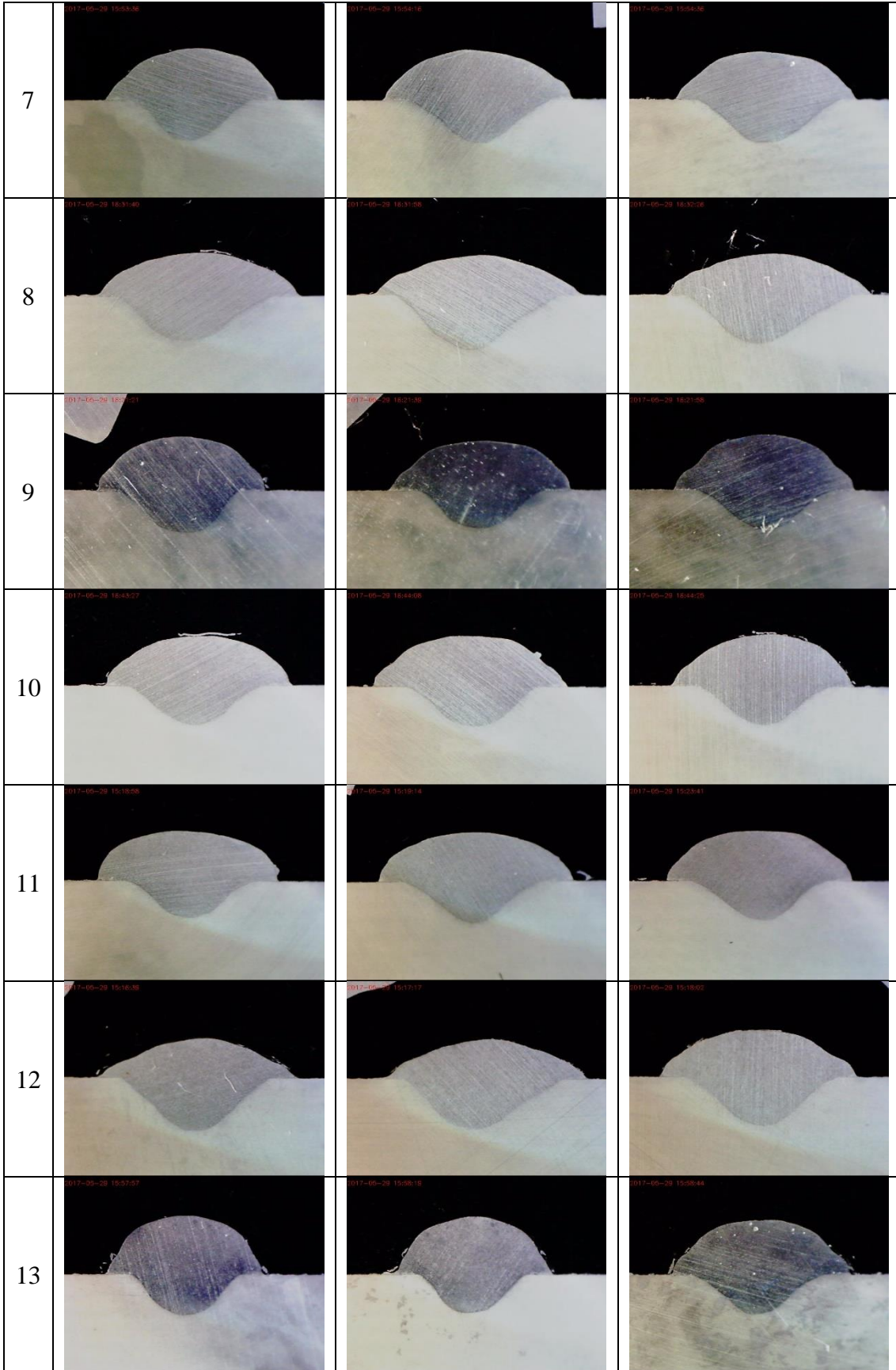
- [12] Tan, X., Wang, J., Xu, Y., Curran, R., Raghunathan, S., Gore, D., & Doherty, J. (2008). Cost-efficient materials in aerospace: Composite vs aluminium. In *Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World* (pp. 259-266). Springer, London.
- [13] Toros, S., Ozturk, F., & Kacar, I. (2008). Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys. *Journal of materials processing technology*, 207(1), 1-12.
- [14] Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V., & Elangovan, K. (2009). Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(3), 286-296.
- [15] Malarvizhi, S., & Balasubramanian, V. (2011). Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties. *transactions of nonferrous metals society of China*, 21(5), 962-973.
- [16] Barnes, T. A., & Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part I—solid and liquid phase welding. *Journal of materials processing technology*, 99(1), 62-71.
- [17] Silva, A. C., Braga, D. F., de Figueiredo, M. A. V., & Moreira, P. M. G. P. (2015). Ultimate tensile strength optimization of different FSW aluminium alloy joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(5-8), 805-814.
- [18] Maddox, S. J. (2003). Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures. *International Journal of Fatigue*, 25(12), 1359-1378.
- [19] James, M. N., Hughes, D. J., Chen, Z., Lombard, H., Hattingh, D. G., Asquith, D., ... & Webster, P. J. (2007). Residual stresses and fatigue performance. *Engineering Failure Analysis*, 14(2), 384-395.
- [20] Gour, L. M. (1995). *Fundamentals of Welding - Principles of Welding Technology*, ch. 7.
- [21] Teng, T. L., Fung, C. P., Chang, P. H., & Yang, W. C. (2001). Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78(8), 523-538.
- [22] Teng, T. L., Chang, P. H., & Tseng, W. C. (2003). Effect of welding sequences on residual stresses. *Computers & structures*, 81(5), 273-286.

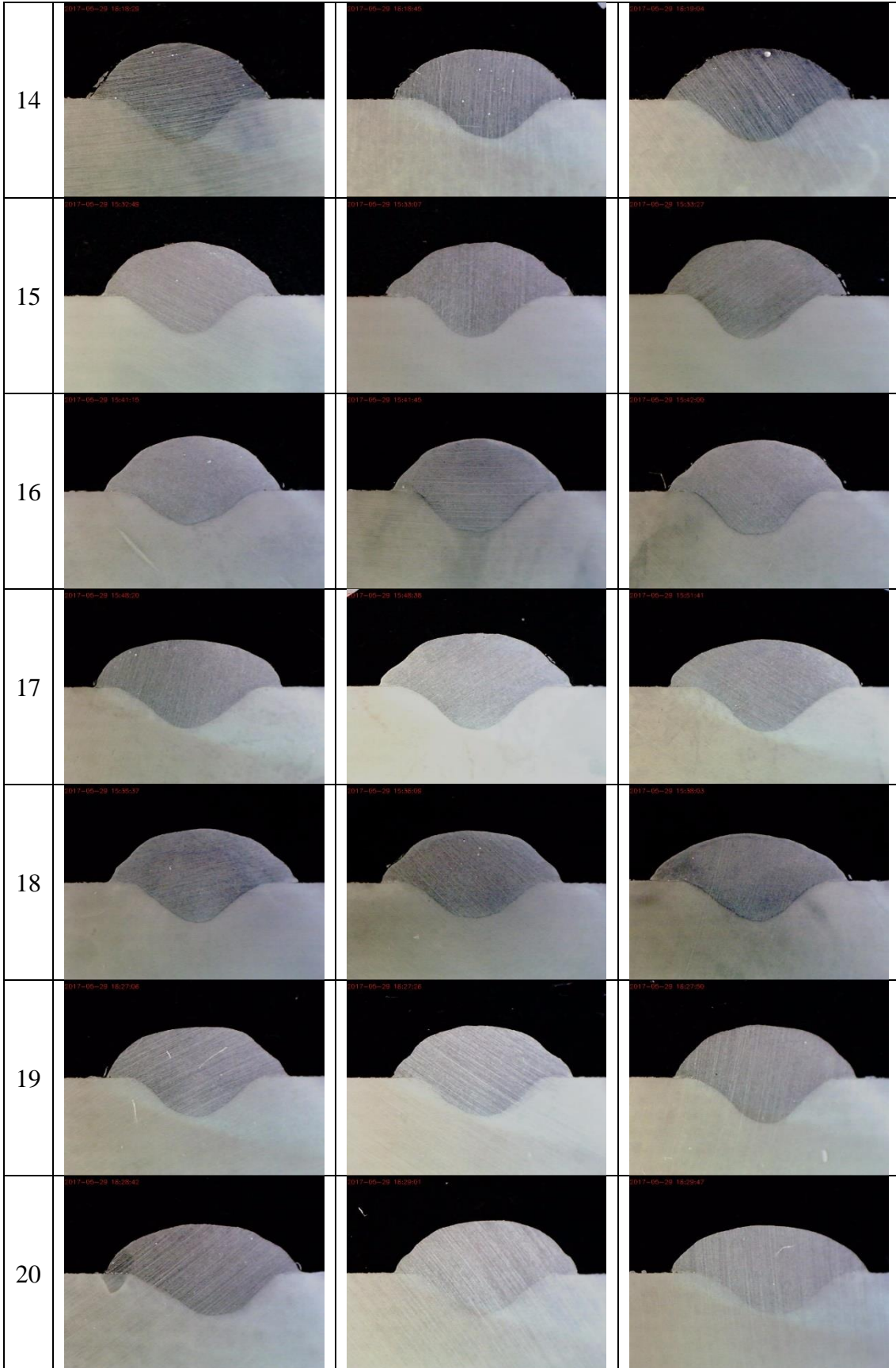
- [23] Ross, P. J. (1988). Taguchi Techniques for Quality Engineering. (2 nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- [24] Wu, Y. & Wu, A. (2000). Taguchi methods for Robust Design. USA: American Society of Mechanical Engineers.
- [25] Nalbant, M., Gökkaya, H., & Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & design*, 28(4), 1379-1385.
- [26] Syrcos, G. P. (2003). Die casting process optimization using Taguchi methods. *Journal of materials processing technology*, 135(1), 68-74.
- [27] Sapakal¹, S. V., & Telsang, M. T. (2012). Parametric optimization of MIG welding using Taguchi design method. *Int J Adv Eng Res Stud*, 1(4), 28-30.
- [28] Pal, S., Malviya, S. K., Pal, S. K., & Samantaray, A. K. (2009). Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(11), 1250-1260.
- [29] Tarng, Y. S., & Yang, W. H. (1998). Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method. *The International Journal of advanced manufacturing technology*, 14(8), 549-554.
- [30] Pan, L. K., Wang, C. C., Hsiao, Y. C., & Ho, K. C. (2005). Optimization of Nd: YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis. *Optics & Laser Technology*, 37(1), 33-42.
- [31] Koilraj, M., Sundareswaran, V., Vijayan, S., & Rao, S. K. (2012). Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083–Optimization of process parameters using Taguchi technique. *Materials & Design*, 42, 1-7.
- [32] Shayfull, Z., Shuaib, N. A., Ghazali, M. F., Nasir, S. M., & Nooraizedfiza, Z. (2011). Optimizing length of weld line formation in thin plate by taguchi method and analysis of variance (ANOVA). *International Journals of Engineering & Technology*, 11(01), 2077-1185.
- [33] Tarng, Y. S., Juang, S. C., & Chang, C. H. (2002). The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, 128(1), 1-6.

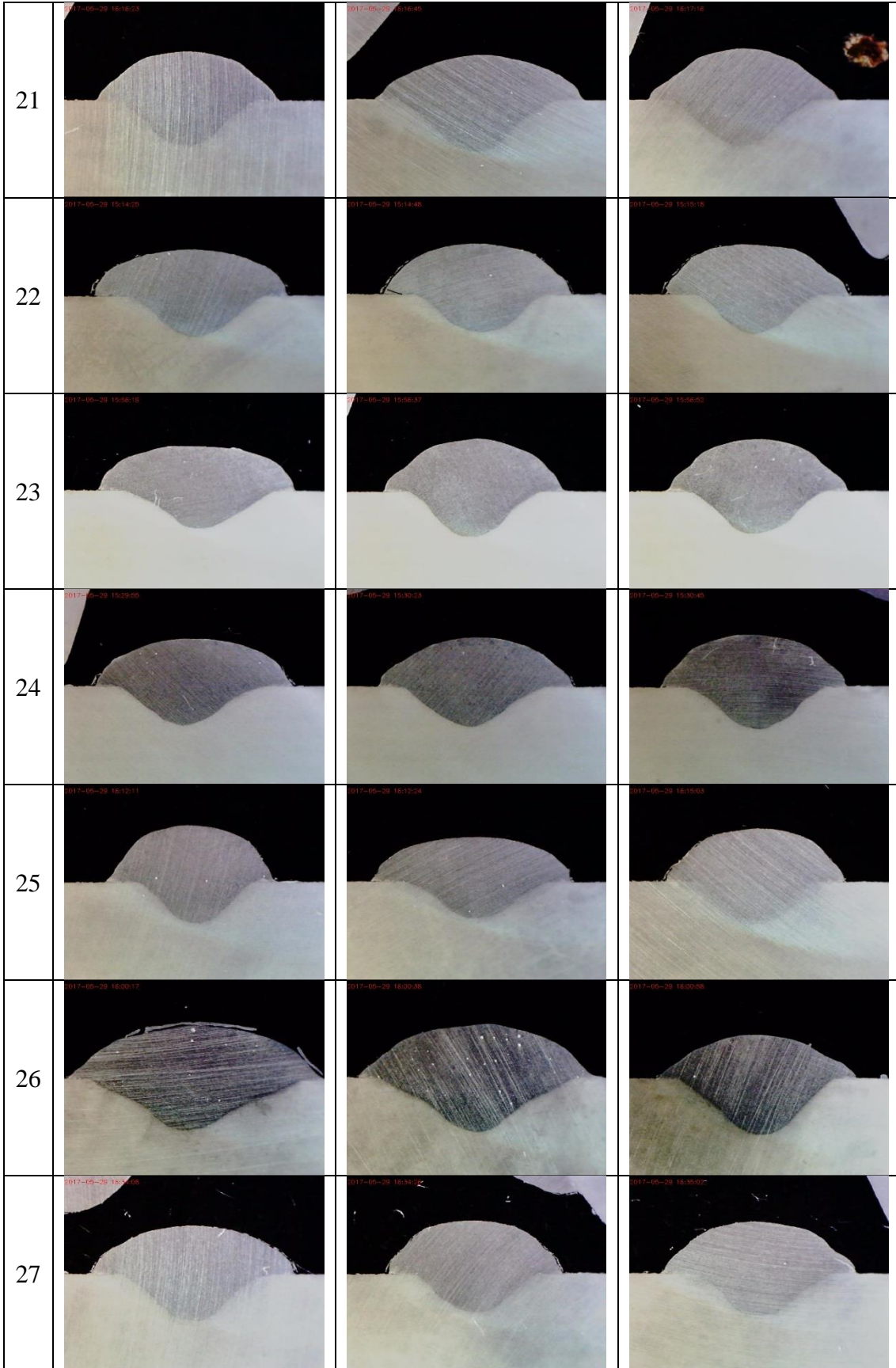
- [34] Tarng, Y. S., Yang, W. H., & Juang, S. C. (2000). The use of fuzzy logic in the Taguchi method for the optimisation of the submerged arc welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(9), 688-694.
- [35] MARTINS, W. (2002). Soldagem do alumínio e suas ligas. *Informe Técnico*.
- [36] ALCAN–Alumínio do Brasil, S. (1993). A. Manual de soldagem. São Paulo.
- [37] Okumura, T., & Taniguchi, C. (1982). *Engenharia de soldagem e aplicações*. LTC.
- [38] Figueiredo, K. M. D. (2002). Mapeamento dos modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio.
- [39] Marques, P. V., Modenesi, P. J., & Bracarense, A. Q. (2005). *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. Ed. da UFMG.
- [40] Wainer, E., Brandi, S. D., & MELLO, F. D. (1992). Soldagem: processos e metalurgia. *Edgard Blücher Ltda, São Paulo*.
- [41] Miranda, H. C., & Ferraresi, V. A. (1999). Proposta de Controle Automático da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG. *Anais do III Seminário do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia*, 8, 53-56.
- [42] Biloni, H., Pérez, T. E., Saggese, M. E., & Solari, M. J. A. (1981). Manual de Soldadura de Aluminio. *Proyecto Especial de Aluminio OEA–CNEA, Gerencia de Investigacion y Desarrollo, Aluar Aluminio Argentino, Buenos Aires, Argentina*.
- [43] Póvoa, A. A. (1988). Seminário Técnico de Soldagem do Alumínio e suas Ligas. *Associação Brasileira do Alumínio*, 26(10).
- [44] Lincoln, J. F. (2000). The procedure handBook of arc welding. *The Lincoln Electric Company*.
- [45] Marques, P. V. (1991). Tecnologia da soldagem. *Belo Horizonte: ESAB*.
- [46] Norrish, J., & Richardson, I. F. (1988). Metal transfer mechanisms.
- [47] Modenesi, P. J. (2001). Introdução à Física do Arco Elétrico Soldagem I. *Departamento Engenharia Metalúrgica UFMG*.
- [48] Coraini, R. (2011). Soldagem GMAW-P robotizada de alumínio: influência do tipo de chanfro, tecimento e sentido de laminação na distorção.


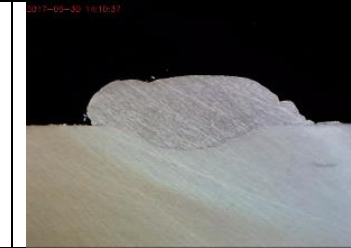

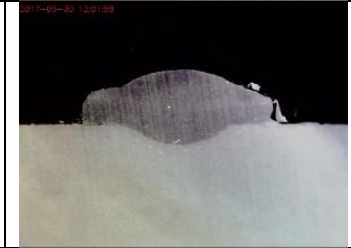
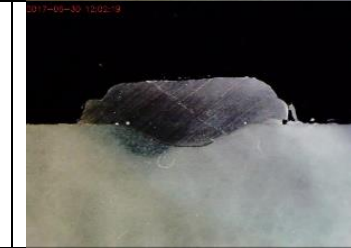

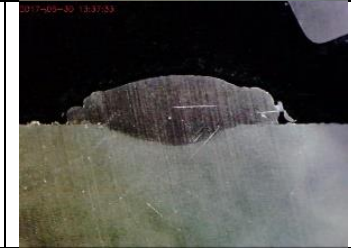
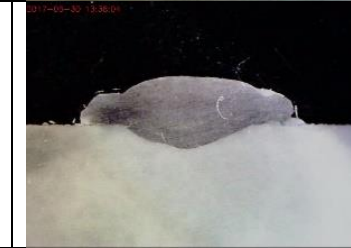

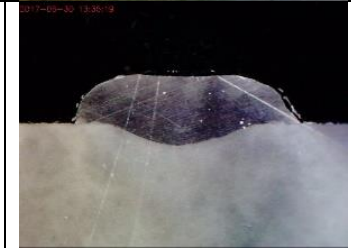
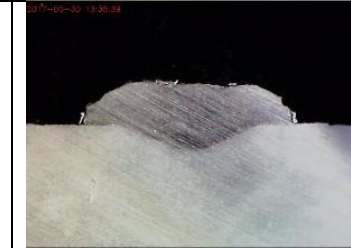
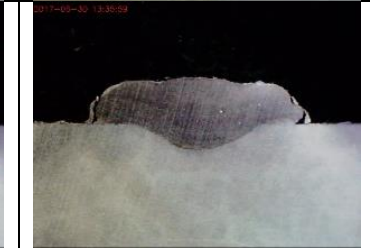
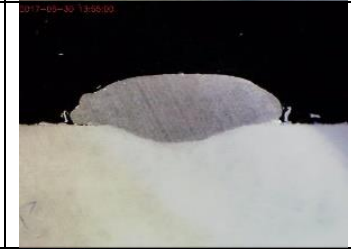
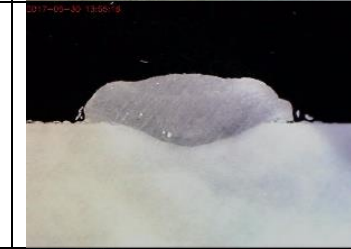



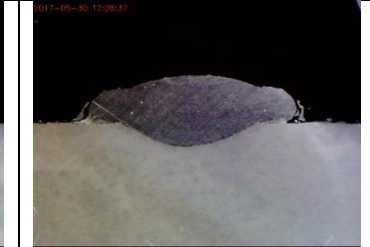
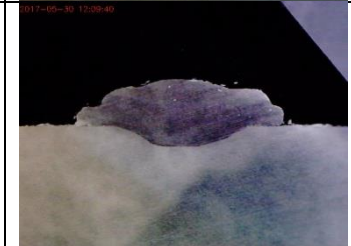


- [49] Inspbrasil. (2016). Ângulo da Tocha X Penetração de soldagem. http://www.inspbrasil.com.br/?menu=exibe_artigos&id=35
- [50] Altshuller, B. (1998). A guide to GMA welding of aluminum: Aluminium welding. *Welding journal*, 77(6), 49-55.
- [51] Lyttle, K. A., & Stapon, W. F. G. (1990). Select the best shielding gas blend for the application. *Welding journal*, 69(11), 21-27.
- [52] Nadzam, J., ARMAO, F., BYALL, L., KOTECKI, D., & MILLER, D. (2006). GMAW welding guide. *The Lincoln Electric Company, Cleveland, Ohio*.
- [53] Souza, D., Resende, A. A., & Scotti, A. (2009). Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. *Soldagem e Inspeção (Impresso)*, 14, 192-198.
- [54] Correa, A. C., & Trevisan, R. E. (2001). Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG Pulsada e Convencional na Morfologia do Cordão e na Microestrutura. In *Primeiro Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação–COBEF*.
- [55] AWS, W. H. (1991). *Welding Technology*. Miami: American Welding Society. 8ª.
- [56] Cunha, J. D., & Grundmann, J. (1995). A Influência dos Gases de Proteção nos Regimes de Transferência Metálica em Soldagem SAMG. *Anais do XXI ENTS, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil*, 513-527.
- [57] Craig, E. (1987). A unique mode of GMAW transfer. *Welding Journal*, 66(9), 51-55.
- [58] Fronius (2007). RCU 5000 i - Operating Instructions, Remote Control.
- [59] Schörghuber, M. (2015). Cold-Metal-Transfer Welding Process and Welding Installation. *U.S. Patent No. 9,035,220*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [60] Pickin, C. G., & Young, K. (2006). Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(5), 583-585.
- [61] Fronius. "MIG/MAG dip-transfer process for automated applications," in CMT: Cold Metal Transfer.
- [62] Fronius (2010). CMT 4000 Advanced - Manual de instruções, Fonte de alimentação MIG/MAG.

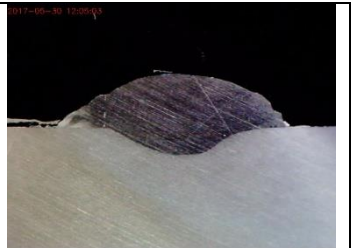

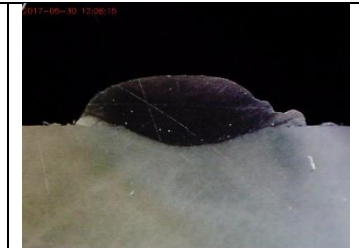
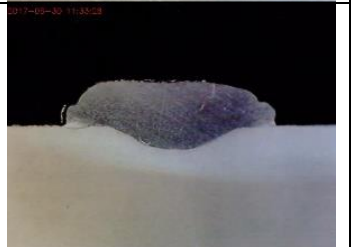


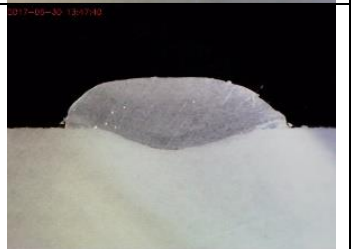
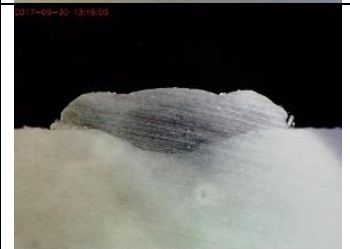
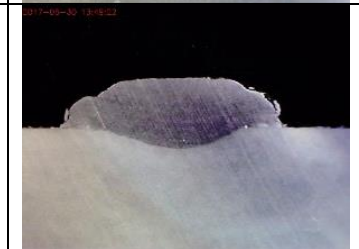
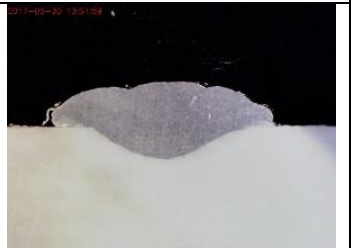
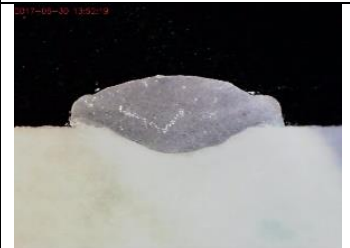
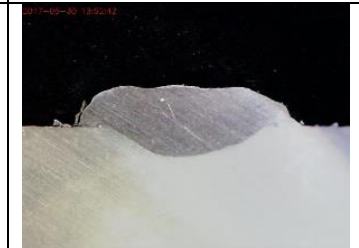
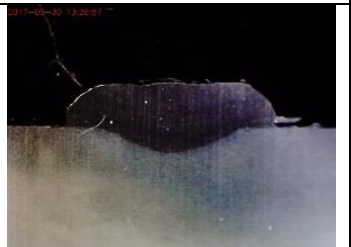
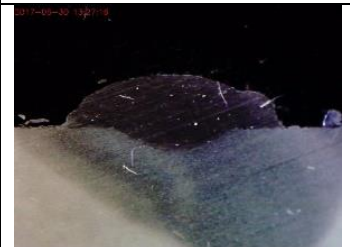
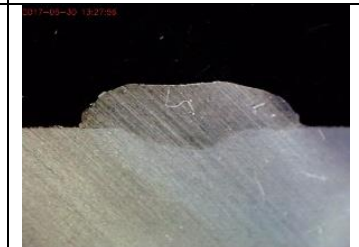

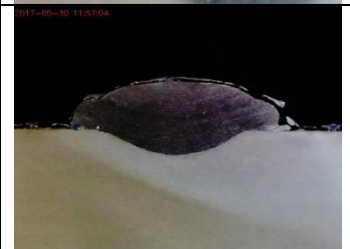
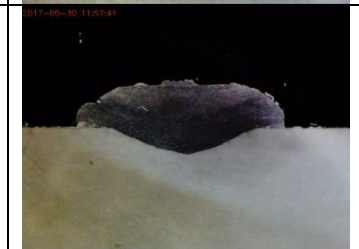
- [63] Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
- [64] DataLyzer. (2010). Metodologia de Taguchi. <http://www.dataalyzer.com.br/site/suporte/administrador/info/arquivos/info22/22.html>
- [65] Suporte ao Minitab 18. O que é razão sinal-ruído em um experimento de Taguchi? <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/what-is-the-signal-to-noise-ratio/>
- [66] Anawa, E. M., & Olabi, A. G. (2008). Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components. *Optics & Laser Technology*, 40(2), 379-388.
- [67] Rohde, R. A. (2010). Metalografia preparação de amostras. *Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3ª Edição, Rio Grande do Sul*.
- [68] de Miranda, E. C., Silva, C. C., Motta, M. F., de Miranda, H. C., Farias, J. P., & Ceará, F. Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio.
- [69] Nalbant, M., Gokkaya, H., & Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials and Design*, 28, 1379-1385.

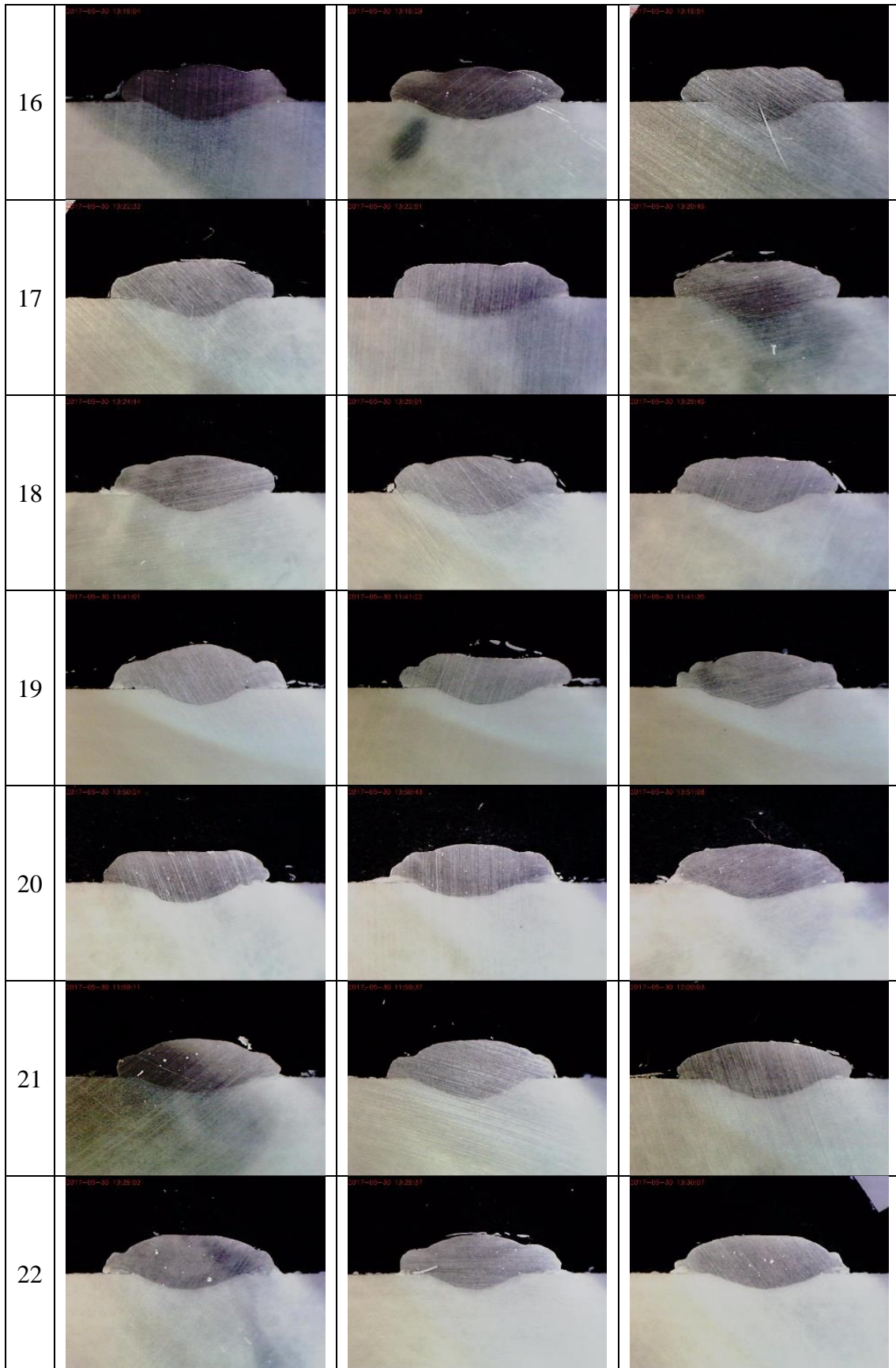


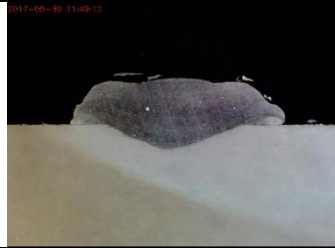
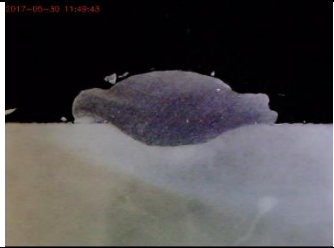
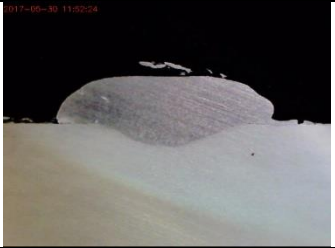
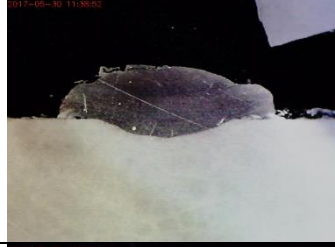


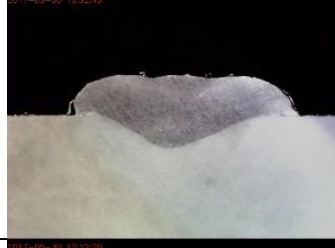
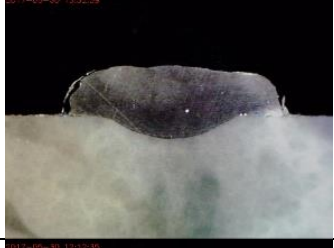
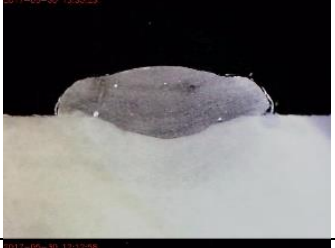
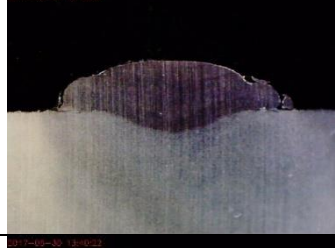
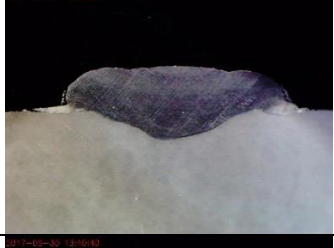
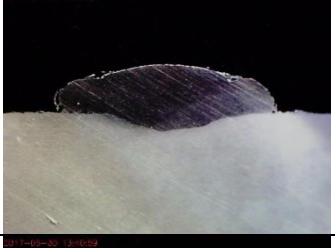
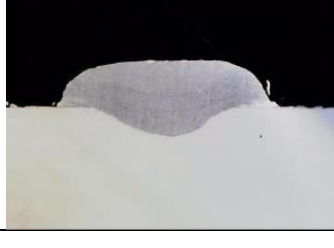
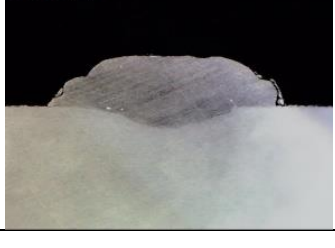
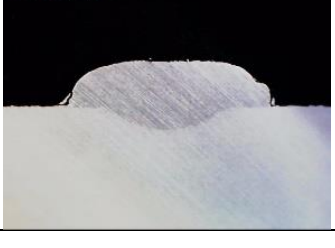


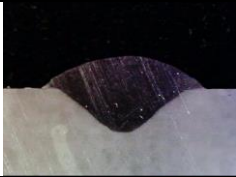
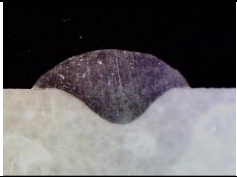
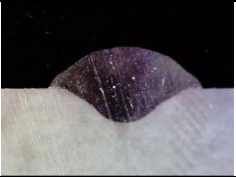
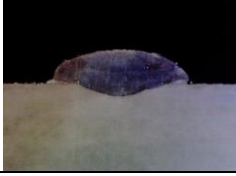
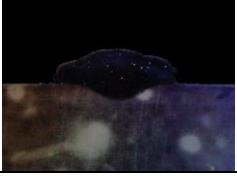
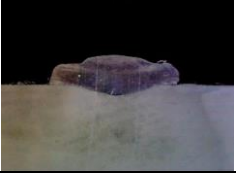


N°	CMT+P		
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			



23			
24			
25			
26			
27			

		Teste de Confirmação		
		Largura	Penetração	Reforço
Pulsado				
CMT+P				

Anexo II

```
/JOB
//NAME SEQUENCIA-1-6
//POS
///NPOS 75,0,75,0,0,0
///TOOL 10
///POSTYPE PULSE
///PULSE
C00000=0,0,0,0,0,0
C00001=-13009,41932,5258,-40665,-72654,47598
C00002=-12909,71096,-5789,-47724,-56611,55132
C00003=-12887,78897,-4265,-49278,-54524,56384
C00004=-12347,87289,6689,-48175,-55948,55275
C00005=-12347,83355,6620,-47228,-57307,54487
C00006=-16337,75481,-3442,-47214,-57416,56163
C00007=-16267,80494,-2329,-48131,-56090,56897
C00008=-15588,88931,8768,-47133,-57539,55766
C00009=-15588,85688,8684,-46416,-58666,55142
C00010=-19070,77956,-1283,-46447,-58526,56697
C00011=-19153,82150,-154,-47077,-57541,57278
C00012=-18359,90665,11090,-46176,-59015,56137
C00013=-18359,87366,11006,-45480,-60181,55521
C00014=-13728,75257,-4570,-48162,-55996,55853
C00015=-13634,79129,-4022,-49028,-54845,56515
C00016=-13060,87598,7040,-47942,-56280,55396
C00017=-13060,84569,6957,-47228,-57316,54798
C00018=-17281,77688,-1900,-47023,-57667,56426
C00019=-17095,80855,-1824,-47814,-56504,57012
C00020=-16379,89412,9399,-46844,-57958,55878
C00021=-16379,86130,9315,-46134,-59105,55252
C00022=-20104,78321,-756,-46087,-59031,56860
C00023=-19914,82718,602,-46757,-57961,57363
C00024=-19095,91237,11819,-45895,-59420,56232
C00025=-19095,87313,11745,-45107,-60826,55502
C00026=-11577,94859,24635,-45195,-60636,52352
C00027=-11565,102151,26545,-46245,-58803,53311
C00028=-11128,112570,40745,-44962,-61032,51953
C00029=-11128,109043,40662,-44313,-62307,51321
C00030=-14670,99115,27316,-44791,-61543,53252
C00031=-14613,103842,28713,-45402,-60393,53808
C00032=-14062,114464,43265,-44214,-62688,52418
C00033=-14062,111546,43163,-43726,-63739,51914
C00034=-17143,101645,29776,-44201,-62723,53729
C00035=-17225,105650,31189,-44611,-61896,54170
C00036=-16578,116535,46138,-43509,-64265,52756
C00037=-16578,113560,46034,-43034,-65350,52256
C00038=-12319,98807,26114,-45468,-60157,52928
C00039=-12237,102375,26796,-46065,-59120,53442
C00040=-11772,112910,41159,-44795,-61373,52071
C00041=-11772,110188,41060,-44307,-62342,51592
C00042=-15529,101388,29173,-44605,-61893,53453
C00043=-15361,104232,29276,-45166,-60816,53921
C00044=-14779,115033,44043,-43998,-63135,52522
C00045=-14779,112079,43940,-43517,-64204,52016
C00046=-18078,102017,30332,-43936,-63227,53890
```

C00047=-17916,106288,32071,-44360,-62344,54248
C00048=-17248,117220,47055,-43294,-64710,52839
C00049=-17248,113685,46963,-42763,-66016,52244
C00050=-12207,82504,8592,-46521,-58399,53814
C00051=-12191,90001,10271,-47818,-56438,54916
C00052=-11706,99140,22482,-46629,-58193,53706
C00053=-11706,95423,22408,-45832,-59507,52999
C00054=-15459,86777,11056,-46066,-59248,54779
C00055=-15397,91612,12281,-46827,-58008,55423
C00056=-14786,100853,24706,-45737,-59802,54188
C00057=-14786,97784,24617,-45135,-60889,53626
C00058=-18056,89239,13317,-45389,-60384,55286
C00059=-18139,93305,14557,-45907,-59475,55797
C00060=-17424,102687,27211,-44909,-61310,54549
C00061=-17424,99562,27121,-44324,-62434,53992
C00062=-12986,86527,9913,-46875,-57849,54461
C00063=-12898,90225,10513,-47604,-56756,55047
C00064=-12383,99456,22853,-46429,-58527,53826
C00065=-12383,96591,22765,-45830,-59528,53290
C00066=-16359,88985,12717,-45877,-59541,55012
C00067=-16183,91979,12804,-46551,-58424,55538
C00068=-15539,101360,25386,-45486,-60230,54298
C00069=-15539,98253,25296,-44890,-61336,53734
C00070=-19038,89599,13849,-45077,-60887,55448
C00071=-18863,93894,15356,-45623,-59906,55879
C00072=-18125,103293,28003,-44662,-61729,54640
C00073=-18125,99576,27923,-44002,-63082,53979
C00074=0,0,0,0,0

///TOOL 0

EC00000=1047,-103362
EC00001=1047,-103362
EC00002=1047,-103362
EC00003=1047,-103362
EC00004=1047,-103362
EC00005=1047,-103361
EC00006=1047,-103361
EC00007=1047,-103361
EC00008=1047,-103361
EC00009=1047,-103361
EC00010=1047,-103361
EC00011=1047,-103361
EC00012=1047,-103361
EC00013=1047,-103361
EC00014=1047,-103361
EC00015=1047,-103361
EC00016=1047,-103361
EC00017=1047,-103361
EC00018=1047,-103361
EC00019=1047,-103361
EC00020=1047,-103361
EC00021=1047,-103361
EC00022=1047,-103361
EC00023=1047,-103361
EC00024=1047,-103361
EC00025=1047,-103361
EC00026=1047,-103362
EC00027=1047,-103362
EC00028=1047,-103362

EC00029=1047,-103361
EC00030=1047,-103361
EC00031=1047,-103361
EC00032=1047,-103361
EC00033=1047,-103361
EC00034=1047,-103361
EC00035=1047,-103361
EC00036=1047,-103361
EC00037=1047,-103361
EC00038=1047,-103361
EC00039=1047,-103361
EC00040=1047,-103361
EC00041=1047,-103361
EC00042=1047,-103361
EC00043=1047,-103361
EC00044=1047,-103361
EC00045=1047,-103361
EC00046=1047,-103361
EC00047=1047,-103361
EC00048=1047,-103361
EC00049=1047,-103361
EC00050=1047,-103362
EC00051=1047,-103362
EC00052=1047,-103362
EC00053=1047,-103361
EC00054=1047,-103361
EC00055=1047,-103361
EC00056=1047,-103361
EC00057=1047,-103361
EC00058=1047,-103361
EC00059=1047,-103361
EC00060=1047,-103361
EC00061=1047,-103361
EC00062=1047,-103361
EC00063=1047,-103361
EC00064=1047,-103361
EC00065=1047,-103361
EC00066=1047,-103361
EC00067=1047,-103361
EC00068=1047,-103361
EC00069=1047,-103361
EC00070=1047,-103361
EC00071=1047,-103361
EC00072=1047,-103361
EC00073=1047,-103361
EC00074=1047,-103362
//INST
///DATE 2017/04/04 21:07
///COMM PRIMEIRO ESTUDO SOLDADURA PLACAS
///ATTR SC,RW
///GROUP1 RB1
///GROUP2 ST1
NOP
MOVJ C00000 VJ=50.00 +MOVJ EC00000 VJ=80.00
MOVJ C00001 VJ=50.00 +MOVJ EC00001 VJ=80.00
MOVJ C00002 VJ=50.00 +MOVJ EC00002 VJ=50.00
ARCSET ASF#(1)
TIMER T=0.10

```

MOVL C00003 V=50.00 +MOVJ EC00003 VJ=50.00 //#####PRG 1 START
ARCON ASF#(1)
MOVL C00004 V=15.0 +MOVJ EC00004 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00005 V=100.00 +MOVJ EC00005 VJ=50.00 //1-1 END
MOVJ C00006 VJ=50.00 +MOVJ EC00006 VJ=50.00
ARCSET ASF#(1)
TIMER T=0.10
MOVL C00007 V=50.00 +MOVJ EC00007 VJ=50.00 //1-2 START
ARCON ASF#(1)
MOVL C00008 V=15.0 +MOVJ EC00008 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00009 V=100.00 +MOVJ EC00009 VJ=50.00 //1-2 END
MOVJ C00010 VJ=50.00 +MOVJ EC00010 VJ=50.00
ARCSET ASF#(1)
TIMER T=0.10
MOVL C00011 V=50.00 +MOVJ EC00011 VJ=50.00 //1-3 START
ARCON ASF#(1)
MOVL C00012 V=15.0 +MOVJ EC00012 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00013 V=100.00 +MOVJ EC00013 VJ=50.00 //#####PRG 1 END
MOVJ C00014 VJ=50.00 +MOVJ EC00014 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(2)
TIMER T=0.10
MOVL C00015 V=50.00 +MOVJ EC00015 VJ=50.00 //#####PRG 2 START
ARCON ASF#(2)
MOVL C00016 V=15.0 +MOVJ EC00016 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00017 V=100.00 +MOVJ EC00017 VJ=50.00 //2-1 END
MOVJ C00018 VJ=50.00 +MOVJ EC00018 VJ=50.00
ARCSET ASF#(2)
TIMER T=0.10
MOVL C00019 V=50.00 +MOVJ EC00019 VJ=50.00 //2-2 START
ARCON ASF#(2)
MOVL C00020 V=15.0 +MOVJ EC00020 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00021 V=100.00 +MOVJ EC00021 VJ=50.00 //2-2 END
MOVJ C00022 VJ=50.00 +MOVJ EC00022 VJ=50.00
ARCSET ASF#(2)
TIMER T=0.10
MOVL C00023 V=50.00 +MOVJ EC00023 VJ=50.00 //2-3 START
ARCON ASF#(2)
MOVL C00024 V=15.0 +MOVJ EC00024 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00025 V=100.00 +MOVJ EC00025 VJ=50.00 //#####PRG 2 END
MOVJ C00026 VJ=50.00 +MOVJ EC00026 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(3)
TIMER T=0.10
MOVL C00027 V=50.00 +MOVJ EC00027 VJ=50.00 //#####PRG 3 START
ARCON ASF#(3)

```

```

MOVL C00028 V=15.0 +MOVJ EC00028 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00029 V=100.00 +MOVJ EC00029 VJ=50.00 //3-1 END
MOVJ C00030 VJ=50.00 +MOVJ EC00030 VJ=50.00
ARCSET ASF#(3)
TIMER T=0.10
MOVL C00031 V=50.00 +MOVJ EC00031 VJ=50.00 //3-2 START
ARCON ASF#(3)
MOVL C00032 V=15.0 +MOVJ EC00032 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00033 V=100.00 +MOVJ EC00033 VJ=50.00 //3-2 END
MOVJ C00034 VJ=50.00 +MOVJ EC00034 VJ=50.00
ARCSET ASF#(3)
TIMER T=0.10
MOVL C00035 V=50.00 +MOVJ EC00035 VJ=50.00 //3-3 START
ARCON ASF#(3)
MOVL C00036 V=15.0 +MOVJ EC00036 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00037 V=100.00 +MOVJ EC00037 VJ=50.00 //#####PRG 3 END
MOVJ C00038 VJ=50.00 +MOVJ EC00038 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(4)
TIMER T=0.10
MOVL C00039 V=50.00 +MOVJ EC00039 VJ=50.00 //#####PRG 4 START
ARCON ASF#(4)
MOVL C00040 V=15.0 +MOVJ EC00040 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00041 V=100.00 +MOVJ EC00041 VJ=50.00 //4-1 END
MOVJ C00042 VJ=50.00 +MOVJ EC00042 VJ=50.00
ARCSET ASF#(4)
TIMER T=0.10
MOVL C00043 V=50.00 +MOVJ EC00043 VJ=50.00 //4-2 START
ARCON ASF#(4)
MOVL C00044 V=15.0 +MOVJ EC00044 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00045 V=100.00 +MOVJ EC00045 VJ=50.00 //4-2 END
MOVJ C00046 VJ=50.00 +MOVJ EC00046 VJ=50.00
ARCSET ASF#(4)
TIMER T=0.10
MOVL C00047 V=50.00 +MOVJ EC00047 VJ=50.00 //4-3 START
ARCON ASF#(4)
MOVL C00048 V=15.0 +MOVJ EC00048 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00049 V=100.00 +MOVJ EC00049 VJ=50.00 //#####PRG 4 END
MOVJ C00050 VJ=50.00 +MOVJ EC00050 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(5)
TIMER T=0.10
MOVL C00051 V=50.00 +MOVJ EC00051 VJ=50.00 //#####PRG 5 START
ARCON ASF#(5)
MOVL C00052 V=15.0 +MOVJ EC00052 VJ=50.00
ARCOF

```

```

TIMER T=4.00
MOVL C00053 V=100.00 +MOVJ EC00053 VJ=50.00 //5-1 END
MOVJ C00054 VJ=50.00 +MOVJ EC00054 VJ=50.00
ARCSET ASF#(5)
TIMER T=0.10
MOVL C00055 V=50.00 +MOVJ EC00055 VJ=50.00 //5-2 START
ARCON ASF#(5)
MOVL C00056 V=15.0 +MOVJ EC00056 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00057 V=100.00 +MOVJ EC00057 VJ=50.00 //5-2 END
MOVJ C00058 VJ=50.00 +MOVJ EC00058 VJ=50.00
ARCSET ASF#(5)
TIMER T=0.10
MOVL C00059 V=50.00 +MOVJ EC00059 VJ=50.00 //5-3 START
ARCON ASF#(5)
MOVL C00060 V=15.0 +MOVJ EC00060 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00061 V=100.00 +MOVJ EC00061 VJ=50.00 //#####PRG 5 END
MOVJ C00062 VJ=50.00 +MOVJ EC00062 VJ=50.00
TIMER T=60.00
ARCSET ASF#(6)
TIMER T=0.10
MOVL C00063 V=50.00 +MOVJ EC00063 VJ=50.00 //#####PRG 6 START
ARCON ASF#(6)
MOVL C00064 V=15.0 +MOVJ EC00064 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00065 V=100.00 +MOVJ EC00065 VJ=50.00 //6-1 END
MOVJ C00066 VJ=50.00 +MOVJ EC00066 VJ=50.00
ARCSET ASF#(6)
TIMER T=0.10
MOVL C00067 V=50.00 +MOVJ EC00067 VJ=50.00 //6-2 START
ARCON ASF#(6)
MOVL C00068 V=15.0 +MOVJ EC00068 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00069 V=100.00 +MOVJ EC00069 VJ=50.00 //6-2 END
MOVJ C00070 VJ=50.00 +MOVJ EC00070 VJ=50.00
ARCSET ASF#(6)
TIMER T=0.10
MOVL C00071 V=50.00 +MOVJ EC00071 VJ=50.00 //6-3 START
ARCON ASF#(6)
MOVL C00072 V=15.0 +MOVJ EC00072 VJ=50.00
ARCOF
TIMER T=4.00
MOVL C00073 V=100.00 +MOVJ EC00073 VJ=50.00 //#####PRG 6 END
MOVJ C00074 VJ=90.00 +MOVJ EC00074 VJ=80.00
END

```

Anexo III

		A	B	C	D				E	F		G	H	I	J	K		L
Programa		Pré fluxo de gás [0 – 9,9s]	Pós fluxo de gás [0 – 9,9s]	Velocidade de alimentação [1 – 22 m/min]	Correção anti- adesão +- 0,2	F- synchro	offset potencia	correção arco voltaico sup	Valor nominal de gás [off – 5 – 30 l/min]	Fator Gás [Auto – 1 – 10]	mod	Corrente inicial (Is) [0 – 200%]	Slope 1 (SI1) [0,1 – 9,9s]	Corrente final (Ie) [0 – 200%]	Tempo inicial (ts) [Desl – 0 – 9,9s]	Tempo final (te) [0,1 – 9,9s]	Tp pontilh	Slope 2 (SI2) [0,1 – 9,9s]
Níveis	1	0,1	0,5	10	-0,2				15	Auto		120	0,3	70	0,7	0,2		0,1
	2	0,5	1,5	8	0				5	5		90	0,1	50	0,5	0,5		0,5
	3	0,9	3	12	0,2				25	10		140	1	100	1,5	1		1
	1	0,1	0,5	10	-0,2	Deslig	2	0	15	Auto	cic S2	120	0,3	70	0,7	0,2	1	0,1
	2	0,1	0,5	10	0	Deslig	2	0	5	5	cic S2	90	0,1	50	0,5	0,5	1	0,5
	3	0,1	0,5	10	0,2	Deslig	2	0	25	10	cic S2	140	1	100	1,5	1	1	1
	4	0,1	1,5	8	-0,2	Deslig	2	0	15	Auto	cic S2	90	0,1	50	1,5	1	1	1
	5	0,1	1,5	8	0	Deslig	2	0	5	5	cic S2	140	1	100	0,7	0,2	1	0,1
	6	0,1	1,5	8	0,2	Deslig	2	0	25	10	cic S2	120	0,3	70	0,5	0,5	1	0,5
	7	0,1	3	12	-0,2	Deslig	2	0	15	Auto	cic S2	140	1	100	0,5	0,5	1	0,5
	8	0,1	3	12	0	Deslig	2	0	5	5	cic S2	120	0,3	70	1,5	1	1	1
	9	0,1	3	12	0,2	Deslig	2	0	25	10	cic S2	90	0,1	50	0,7	0,2	1	0,1
	10	0,5	0,5	12	-0,2	Deslig	2	0	5	10	cic S2	120	0,1	100	0,7	0,5	1	1
	11	0,5	0,5	12	0	Deslig	2	0	25	Auto	cic S2	90	1	70	0,5	1	1	0,1
	12	0,5	0,5	12	0,2	Deslig	2	0	15	5	cic S2	140	0,3	50	1,5	0,2	1	0,5

	A	B	C	D				E	F		G	H	I	J	K		L
Programa	Pré fluxo de gás [0 – 9,9s]	Pós fluxo de gás [0 – 9,9s]	Velocidade de alimentação [1 – 22 m/min]	Correção anti- adesão +- 0,2	F- synchro	offset potencia	correção arco voltaico sup	Valor nominal de gás [off – 5 – 30 l/min]	Fator Gás [Auto – 1 – 10]	mod	Corrente inicial (Is) [0 – 200%]	Slope 1 (S11) [0,1 – 9,9s]	Corrente final (Ie) [0 – 200%]	Tempo inicial (ts) [Desl – 0 – 9,9s]	Tempo final (te) [0,1 – 9,9s]	Tp pontilh	Slope 2 (S12) [0,1 – 9,9s]
13	0,5	1,5	10	-0,2	Deslig	2	0	5	10	cic S2	90	1	70	1,5	0,2	1	0,5
14	0,5	1,5	10	0	Deslig	2	0	25	Auto	cic S2	140	0,3	50	0,7	0,5	1	1
15	0,5	1,5	10	0,2	Deslig	2	0	15	5	cic S2	120	0,1	100	0,5	1	1	0,1
16	0,5	3	8	-0,2	Deslig	2	0	5	10	cic S2	140	0,3	50	0,5	1	1	0,1
17	0,5	3	8	0	Deslig	2	0	25	Auto	cic S2	120	0,1	100	1,5	0,2	1	0,5
18	0,5	3	8	0,2	Deslig	2	0	15	5	cic S2	90	1	70	0,7	0,5	1	1
19	0,9	0,5	8	-0,2	Deslig	2	0	25	5	cic S2	120	1	50	0,7	1	1	0,5
20	0,9	0,5	8	0	Deslig	2	0	15	10	cic S2	90	0,3	100	0,5	0,2	1	1
21	0,9	0,5	8	0,2	Deslig	2	0	5	Auto	cic S2	140	0,1	70	1,5	0,5	1	0,1
22	0,9	1,5	12	-0,2	Deslig	2	0	25	5	cic S2	90	0,3	100	1,5	0,5	1	0,1
23	0,9	1,5	12	0	Deslig	2	0	15	10	cic S2	140	0,1	70	0,7	1	1	0,5
24	0,9	1,5	12	0,2	Deslig	2	0	5	Auto	cic S2	120	1	50	0,5	0,2	1	1
25	0,9	3	10	-0,2	Deslig	2	0	25	5	cic S2	140	0,1	70	0,5	0,2	1	1
26	0,9	3	10	0	Deslig	2	0	15	10	cic S2	120	1	50	1,5	0,5	1	0,1
27	0,9	3	10	0,2	Deslig	2	0	5	Auto	cic S2	90	0,3	100	0,7	1	1	0,5

Anexo IV

Nível e razão sinal/ruído média selecionados do modo Pulsado																							
Largura																							
A1	18,998	B1	18,273	C1	13,225	D1	15,672	E1	14,439	F1	14,889	G1	16,292	H1	17,700	I1	13,017	J1	16,25	K1	17,095	L1	15,990
A2	15,957	B2	15,421	C2	17,735	D2	16,230	E2	16,347	F2	18,613	G2	12,790	H2	13,731	I2	16,781	J2	14,617	K2	12,368	L2	15,821
A3	11,669	B3	12,93	C3	15,664	D3	14,722	E3	15,837	F3	13,122	G3	17,541	H3	15,192	I3	16,826	J3	15,757	K3	17,161	L3	14,813
Penetração																							
A1	21,162	B1	25,148	C1	21,299	D1	26,384	E1	23,528	F1	23,343	G1	24,473	H1	22,531	I1	21,243	J1	23,217	K1	25,391	L1	21,551
A2	25,614	B2	23,717	C2	22,383	D2	22,755	E2	23,759	F2	21,190	G2	25,071	H2	24,758	I2	22,008	J2	23,161	K2	24,918	L2	22,555
A3	22,833	B3	20,744	C3	25,927	D3	20,469	E3	22,322	F3	25,076	G3	20,065	H3	22,32	I3	26,357	J3	23,231	K3	19,300	L3	25,503
Reforço																							
A1	-4,960	B1	-4,973	C1	-5,464	D1	-5,410	E1	-5,110	F1	-5,183	G1	-5,155	H1	-5,003	I1	-5,195	J1	-5,325	K1	-5,157	L1	-5,274
A2	-5,342	B2	-5,366	C2	-5,181	D2	-4,969	E2	-5,140	F2	-4,935	G2	-5,353	H2	-5,280	I2	-5,178	J2	-5,360	K2	-5,271	L2	-5,205
A3	-5,217	B3	-5,180	C3	-4,874	D3	-5,140	E3	-5,270	F3	-5,401	G3	-5,011	H3	-5,236	I3	-5,146	J3	-4,834	K3	-5,091	L3	-5,041

Nível e razão sinal/ruído média selecionados do modo CMT+P																							
Largura																							
A1	16,365	B1	15,473	C1	17,804	D1	16,228	E1	18,877	F1	14,650	G1	15,724	H1	14,647	I1	17,553	J1	16,804	K1	17,223	L1	17,612
A2	17,568	B2	15,864	C2	15,900	D2	15,361	E2	15,396	F2	17,839	G2	13,626	H2	15,047	I2	14,441	J2	15,827	K2	16,113	L2	14,594
A3	13,993	B3	16,589	C3	14,221	D3	16,336	E3	13,652	F3	15,436	G3	18,576	H3	18,232	I3	15,931	J3	15,294	K3	14,590	L3	15,720
Penetração																							
A1	25,055	B1	24,918	C1	23,547	D1	24,036	E1	23,572	F1	24,613	G1	23,137	H1	26,267	I1	25,375	J1	24,925	K1	21,247	L1	26,895
A2	24,820	B2	27,944	C2	23,066	D2	24,604	E2	22,899	F2	24,484	G2	26,152	H2	22,605	I2	23,557	J2	25,924	K2	25,470	L2	23,022
A3	24,309	B3	21,322	C3	27,571	D3	25,543	E3	27,713	F3	25,087	G3	24,895	H3	25,312	I3	25,252	J3	23,335	K3	27,467	L3	24,267
Reforço																							
A1	-2,811	B1	-2,794	C1	-2,813	D1	-2,773	E1	-2,765	F1	-2,720	G1	-2,873	H1	-2,859	I1	-2,817	J1	-2,935	K1	-2,758	L1	-2,781
A2	-2,657	B2	-2,879	C2	-2,781	D2	-2,917	E2	-2,909	F2	-2,920	G2	-2,696	H2	-2,747	I2	-2,813	J2	-2,643	K2	-2,836	L2	-2,753
A3	-2,915	B3	-2,709	C3	-2,789	D3	-2,693	E3	-2,709	F3	-2,743	G3	-2,814	H3	-2,776	I3	-2,753	J3	-2,805	K3	-2,789	L3	-2,849

